APPUNTI DI ELETTRONICA

VOL. 2

Supplemento al n. 11 di SELEZIONE
Sped. in Abb. Postale Gruppo III/70

STRUTTURA DELL'OPERA

Questo libro è costituito da una raccolta di fogli che trattano ciascuno un solo argomento come risulta dalla intestazione unificata.

L'argomento trattato su ogni singola pagina, viene esaurito nella stessa pagina.

In questo modo si evita che le figure possano trovarsi in pagine diverse da quelle del testo e perciò la lettura viene facilitata.

CARATTERISTICHE

Il libro è costituito da una raccolta di fogli mobili ognuno dei quali tratta un singolo argomento.

Grazie a questa soluzione, l'opera non perde validità nel tempo risultando continuamente aggiornabile.

In particolare la soluzione adottata risulta utile per:

1) — il lettore che intendesse aggiungere suoi appunti
2) — il lettore che volesse inserire dei cartoncini separatori per facilitare la ricerca e per meglio suddividere i capitoli
3) — inserire eventuali fogli aggiuntivi che nel futuro venissero pubblicati
4) — effettuare confronti di analogie con altri fogli della raccolta.

A questo scopo si segnala che il codice decimale di collocazione, posto accanto alla testata unificata, vuole ottenere lo scopo di permettere l'inserzione di fogli senza interferire sulla struttura stessa della pubblicazione.

Il lettore può dotare di linguette sporgenti con il richiamo del codice ogni foglio relativo ai vari indici.

In questo modo si facilita la ricerca e la consultazione.

Non si è voluto predisporre questo vantaggio in sede redazionale per non rendere troppo costoso ogni volume.

METODO DI SPIEGAZIONE

Si è voluto dare alle figure un valore preponderante usando il testo come ausiliario esplicativo delle stesse.

Questo metodo, che si allontana dall'ortodossia tradizionale, è stato gradito dai lettori della precedente esperienza editoriale (v. presentazione vol. 1°).

Essi hanno riconosciuto in questo metodo una forza comunicativa notevole e molto più vicina a quella della viva voce dell'insegnante che spiega alla lavagna dialogando con gli allievi.

Vorremmo che il lettore apprezzasse quanto questo metodo abbia richiesto maggior dedizione da parte dell'autore e della Redazione e maggiori costi da parte dell'Editore.

CONTRASSEGNI SULLE PAGINE

I contrassegni riportati sulle pagine in alto a destra hanno il seguente scopo:

nessun contrassegno	pagine sufficienti per coloro che vogliono accontentarsi di una conoscenza superficiale
una stella ★	pagine destinate a coloro che desiderano una maggior conoscenza della materia, ma non possono essere trascurate dai lettori delle sole pagine senza contrassegno per quanto riguarda le conclusioni
due stelle ★ ★	pagine destinate solo a coloro che desiderano un maggior approfondimento.

CRITERIO DI NUMERAZIONE DECIMALE DEI FOGLI

A) SUDDIVISIONE

L'opera è suddivisa in	10 sezioni
Ogni sezione è suddivisa in	10 capitoli
Ogni capitolo è suddiviso in	10 paragrafi
Ogni paragrafo è suddiviso in	10 argomenti

B) CODICE DI NUMERAZIONE DELLE PAGINE DI TESTO

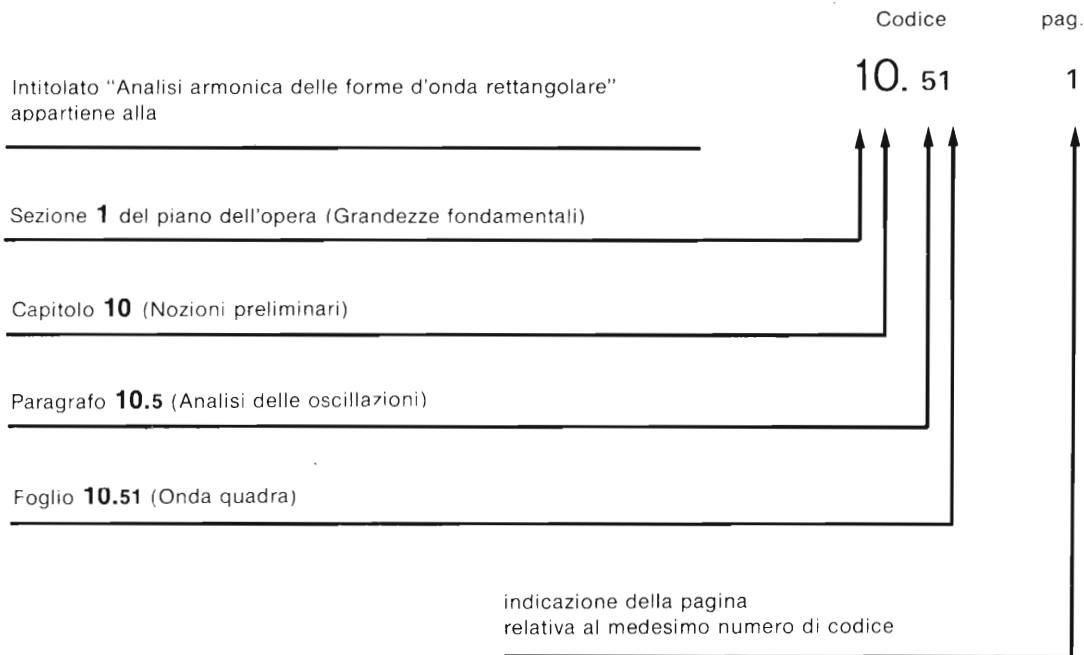
Normalmente ogni foglio è individuato da un

codice di quattro cifre

suddivisione in due gruppi di due cifre
(due cifre intere e due cifre decimali)

Le due cifre intere sono stampate in corpo maggiore per evitare confusioni → 12.345 ← Una quinta cifra può esistere se si vuole suddividere ulteriormente il soggetto relativo alla cifra precedente

Ogni cifra si riferisce ad una suddivisione del soggetto relativo alla cifra precedente.

C) ESEMPIO: il foglio

Capitolo 12

GRANDEZZE FONDAMENTALI ELETTROMAGNETICHE, MAGNETICHE, ELETTROSTATICHE

Indice dei paragrafi e degli argomenti

Paragrafo 12.0

INDICE

Indice degli argomenti e delle pagine

INDICE ANALITICO

Avvertenza

Ricordando il criterio di codificazione espresso in **00.**01-2 (vol. 1°)

se l'indicazione è rappresentata con:		significa che la voce cercata è trattata:
una sola cifra	(es.: 1)	nell'intera **sezione** relativa alla cifra indicata
due cifre	(es.: 12)	nell'intero **capitolo** relativo alle cifre indicate
tre cifre	(es.: 13.7)	nell'intero **paragrafo** relativo alle cifre indicate
quattro cifre	(es.: 12.42)	nell'intero **argomento** relativo alle cifre indicate
cinque cifre	(es.: 13.24-1)	nella **pagina** relativa alle cifre indicate

— LIBRI —

Abbreviazione	Autore	Titolo	Editore
Bottani	E. Bottani R. Sartori	Lezioni sui fondamenti dell'Elettronica	Libreria Editrice Politecnico 1944
Colombo	A. Colombo	Manuale dell'ingegnere	Hoepli 1947
Mondani	F. Mondani	Elementi di elettronica e di elettrotecnica 2 voll.	Trevisini 1966
Giometti	R. Giometti F. Frascari	Elettrotecnica Elettronica Radiotecnica	Calderini 1 vol. 1973 2 vol. 1974
E.S.T.		Enciclopedia della Scienza e della Tecnica	Mondadori 1965

— RIVISTE —

Sigla	Titolo	Editore
TA	Tecniche dell'Automazione	ETAS KOMPASS
Sp	Sperimentare	J.C.E.
S.R.	Selezione Radio TV	J.C.E.
E.O.	Elettronica Oggi	Gruppo Editoriale Jackson

PANORAMICA SISTEMATICA DEI FENOMENI CHE RIGUARDANO IL PRESENTE CAPITOLO

SEQUENZA DIDATTICA

Contrariamente alle abitudini di introdurre la materia di insegnamento secondo i tempi storici relativi alla scoperta dei fenomeni fondamentali sotto i quali gli argomenti vengono inquadrati, abbiamo qui preferito dare la precedenza a quelle grandezze che più frequentemente riguardano l'elettronica.

Questo non significa che gli uni siano più importanti degli altri: sono tutti ugualmente importanti e l'ignoranza di qualche argomento può creare delle gravi lacune sul proseguimento dello studio, soprattutto in questa fase che riguarda la conoscenza delle grandezze fondamentali.

Daremo perciò la sequenza illustrata in questa pagina.

ELETTROMAGNETISMO

E' la scienza dell'elettrone in movimento.

E' cioè lo studio di quei fenomeni che si producono quando esso si muove. E non basta. Se esso è in fase di accelerazione o di rallentamento, se ne producono anche altri e non meno importanti.
Sono questi fenomeni che governano la vita di oggi.

I motori elettrici, le antenne, i microfoni, la radio, la televisione, gli strumenti più svariati, sfruttano largamente questi fenomeni.

Si può dire che non ci sia campo della tecnologia come dell'artigianato più primordiale che non si avvalga di qualcosa di elettromagnetico, sia esso un trapano a mano o il motore elettrico che muove il tornio primitivo del vasaro.

MAGNETISMO

Il mistero sulla natura dei magneti pare oggi completamente risolto.

Si è dovuto indagare nell'interno dell'atomo per trovare la soluzione che si associasse al concetto di movimento dell'elettrone al livello della sua rotazione attorno al nucleo.

Non ne faremo cenno in questa trattazione di base perchè ci porterebbe lontano dallo scopo che vogliamo raggiungere.

Ne sarà riservato un paragrafo particolare nel capitolo riguardante la fenomenologia.

ELETTROSTATICA

E' la scienza dell'elettrone come carica elettrica in sè: sia essa ferma o in moto. Il problema della staticità nasce solo dal fatto che, per affrancarne lo studio dai fenomeni elettromagnetici, è indispensabile indagare l'elettrone fermo.

Questa scienza è forse la prima in ordine storico ed i relativi fenomeni propedeutici sono forse anche i più semplici da immaginare.

Essa è partita da un fenomeno associato ad un materiale, l'ambra, che nell'antica Grecia si chiamava **"electron"** e che, strofinato, attirava peli e frammenti di foglie secche. Ed è questo nome che ha battezzato l'intero ramo della Fisica che si chiama Elettricità.

CONCLUSIONE

L'arte di far ballare le danze più frenetiche a miliardi di elettroni, facendoli oscillare al ritmo che ci interessa e facendo interagire elettromagnetismo ed elettrostatica, passa con il nome di Elettronica.

DEFINIZIONI DI CAMPO ELETTRICO, MAGNETICO, GRAVITAZIONALE

Si ricerca una definizione di campo in generale attraverso lo studio di fenomeni in particolare.

Campo gravitazionale

Il sasso che cade e il moto dei pianeti sono fenomeni ormai tradizionali per spiegare che fra due masse si forma una forza di attrazione.

Un punto qualsiasi dello spazio dove sono presenti più masse, sarà soggetto ad una forza "gravitazionale" che corrisponderà alla risultante vettoriale della interazione delle singole forze.

Le linee che costituiscono il luogo geometrico delle direzioni delle varie risultanti, danno un'idea dell'andamento del campo gravitazionale ed esse stesse si chiamano anche linee del flusso gravitazionale.

Il filo a piombo è lo strumento più semplice, più caratteristico e preciso della direzione della forza di gravitazione.

Campo magnetico

Nello spazio non ci sono solo forze gravitazionali.

Infatti, se lasciamo libero di ruotare in qualsiasi direzione l'ago magnetico di una bussola, esso non indicherà la stessa direzione del filo a piombo, ma in generale un'altra, che da noi qui è abbastanza vicina alla orizzontale.

L'ago magnetico è dunque sensibile ad una forza di natura magnetica.

Se seguiamo la direzione dell'ago tracceremo una linea di forza magnetica. In un altro punto dello spazio passerà un'altra linea.

Tutte insieme queste linee danno un'idea precisa dell'andamento del campo magnetico in quella regione di spazio.

Campo elettrico

Nello spazio ci sono anche altre forze, come per esempio quella elettrica.

Prendiamo il classico bastoncino di materiale resinoso ed isolante come la plastica, sfreghiamola: esso si caricherà elettricamente.

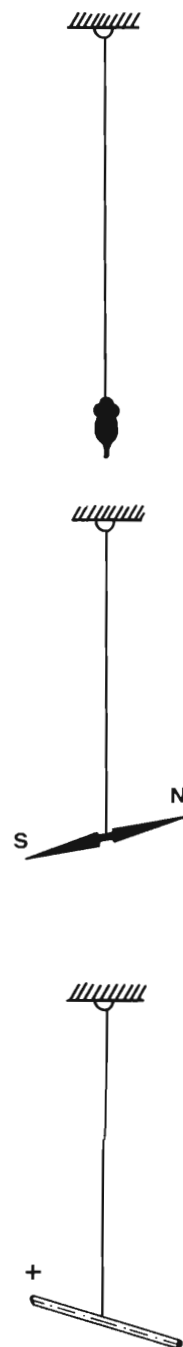
Sospendiamolo ad un filo sottile, insensibile alla torsione. Il fenomeno qui sarà difficile da realizzare data la modestia delle forze in gioco, comunque ci renderemo conto che nello stesso punto dove abbiamo fatto i due esperimenti precedenti, ci troveremo di fronte ad una terza forza: quella del campo elettrostatico.

+ −

Campo in generale

Quelli descritti sono i campi che più frequentemente lo studioso di elettronica dovrà trattare.

E' evidente che qualsiasi altro fattore che produca una forza, è sede di un campo che prenderà il nome della natura del fenomeno in questione.

Questi campi possono essere in correlazione con quelli fino a qui nominati, o fra di loro, o essere assolutamente indipendenti.

Paragrafo 12.1

ELETTROMAGNETISMO, FORZA MAGNETOMOTRICE, FLUSSO MAGNETICO, RILUTTANZA

Indice degli argomenti e delle pagine

IL FLUSSO MAGNETICO NON SI PUO' INTERROMPERE COME UNA CORRENTE ELETTRICA

Dopo un breve cenno storico si stigmatizza l'imprescindibilità del flusso magnetico dalla forza magnetomotrice.

Magneti naturali

La presenza di campi magnetici permanenti era nota fin dall'antichità attraverso il fenomeno dell'attrazione dei materiali ferrosi da parte di sostanze naturali, che furono chiamate prima *''calamite''* e poi magneti permanenti.

Elettromagneti

Con l'invenzione della corrente elettrica si scoperse che

una carica elettrica in movimento

crea fenomeni magnetici del tutto identici a quelli fino allora conosciuti.

Gli studiosi si diedero da fare per dare una struttura organica a tutti i fenomeni inerenti al magnetismo, fosse esso naturale, permanente o creato artificialmente mediante movimento delle cariche (corrente elettrica).

Siamo intorno all'anno 1815 ed i fisici che se ne occuparono maggiormente furono Oersted e Ampere.

Esperimenti

La direzione di questo *''influsso''*, poi chiamato *''flusso''*, cioè:

corrente (da fluo, fluere = scorrere) magnetica,

veniva inseguita da Oersted con lo stesso ago magnetico che fino allora veniva soltanto usato nelle bussole per indicare il Nord.

Caratteristica del flusso magnetico

Si scoperse così che il flusso magnetico esiste sempre attorno ad ogni dipolo magnetico elementare generatore di magnetismo.

In altre parole, il flusso magnetico non si può interrompere come si può fare con una corrente elettrica: esso si chiuderà sempre, anche attraverso il vuoto, attorno al suo dipolo generatore naturale (magnete permanente) o artificiale (corrente elettrica).

Il flusso magnetico può soltanto essere deviato

Quando esiste un generatore di magnetismo in una determinata zona, essendo impossibile interrompere il flusso che si sprigiona,

se non si può

a) eliminare la sorgente di magnetismo, cioè togliere o allontanare il magnete permanente o arrestare la corrente che la genera,

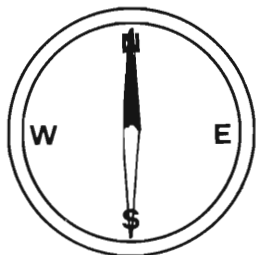
si potrà

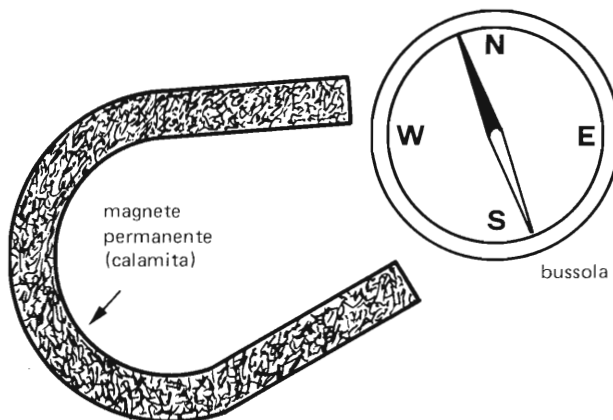
b) deviare il flusso stesso, cioè fargli fare un altro percorso attraverso sostanze, generalmente ferrose, attraverso le quali il flusso magnetico preferisce passare (schermatura magnetica).

Prologo del paragrafo

Vedremo nelle pagine che seguono, come l'uomo si sia impadronito di questi fenomeni per costruire macchine ed apparecchi che caratterizzano la vita moderna.

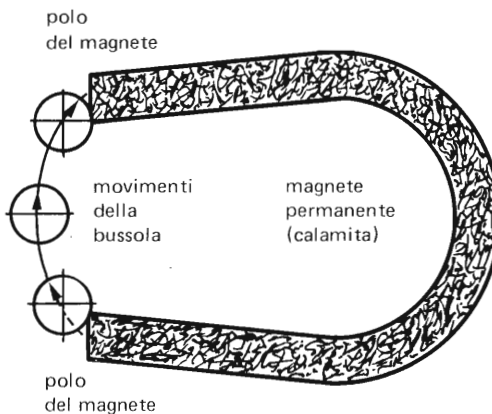
DIREZIONE DEL FLUSSO MAGNETICO

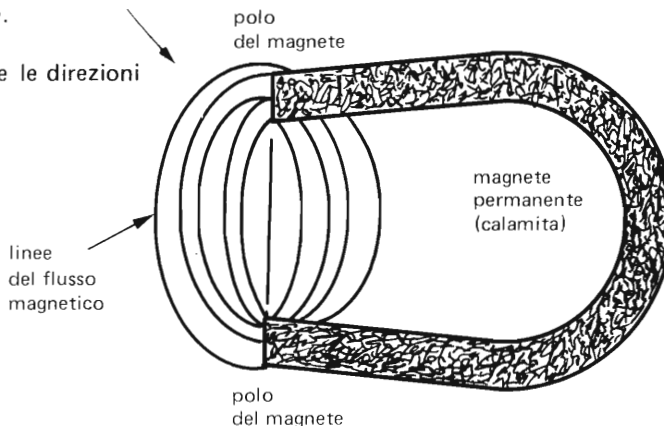
Attraverso fenomeni già noti nel passato si determina la direzione del flusso magnetico.

bussola

L'ago magnetico di una bussola indica il Nord, perchè la Terra è un magnete permanente naturale i cui poli sono abbastanza vicini ai corrispondenti poli geografici. I poli magnetici di nome opposto hanno la facoltà di attrarsi.

bussola

Supponiamo ora di avere una bussola abbastanza piccola da poterla muovere facilmente in una zona attorno ai poli di un magnete permanente.

Sistemata la bussola in un punto, effettuiamo dei piccoli movimenti, seguendo la direzione che man mano sarà indicata dall'ago, sia in avanti che indietro.

Supponiamo inoltre che questi movimenti lascino una traccia in corrispondenza dell'asse di rotazione dell'ago, avremo tracciato una linea che va da un polo all'altro del magnete.

Se poi poniamo la bussola in altri punti della zona non appartenenti a linee già tracciate e continuiamo l'esperimento, alla fine avremo tracciato un insieme di linee che vanno da un polo all'altro del magnete.

Abbiamo esplorato il campo magnetico e le direzioni del flusso.

CONCETTO DI CAMPO E FLUSSO MAGNETICI

L'elettromagnetismo è il cardine del modo di vivere moderno.

Individuare e sfruttare il fenomeno

La maggiore difficoltà che si incontra nell'apprendimento dei fenomeni elettromagnetici è principalmente dovuta al fatto che è impossibile concepire un circuito magnetico aperto poichè non esistono in natura sostanze magneticamente isolanti o comunque refrattarie a lasciarsi attraversare dal flusso magnetico.

La stessa aria e perfino il vuoto, come anche i materiali cosiddetti *"non magnetici"*, sono buoni conduttori di magnetismo: si dicono infatti magneticamente **permeabili**.

Per questo motivo noi viviamo immersi in una specie di fluido magnetico orientato, dal quale siamo anche attraversati come qualsiasi oggetto.

Questo fluido magnetico è orientato senza essere in movimento, cambia direzione più o meno lentamente, oscilla, vibra anche ad altissime frequenze, ma non c'è nulla di magnetico che si muova.

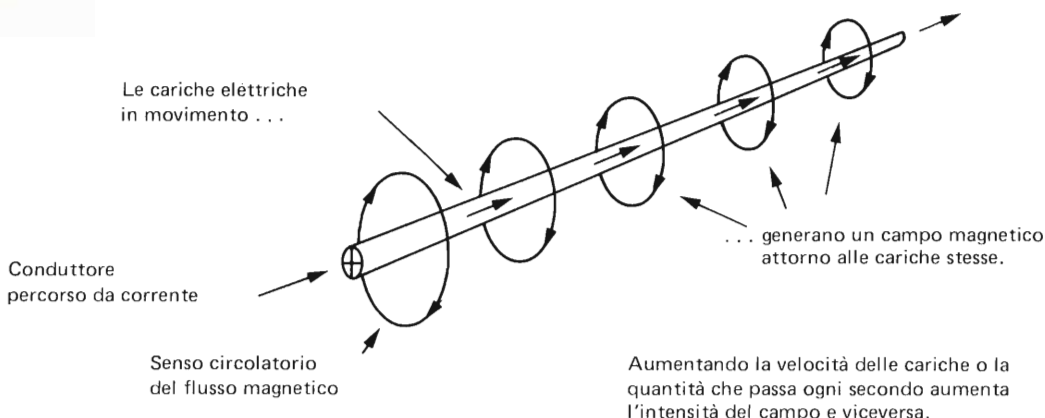
Ci sono sì le cariche che, per generare il magnetismo, è indispensabile che siano in movimento, ma queste sono elettriche, non magnetiche.

Il magnetismo è uno stato della materia, un modo di essere che obbedisce a certe leggi che l'uomo ha cercato di scoprire per renderle intelligibili alla sua mentalità finita e per sfruttare le proprietà del magnetismo stesso per crearsi un ambiente più confortevole di vita.

Questo fluido orientato lo dobbiamo immaginare in movimento, anche se non lo è, per infiniti canali che costituiscono le *"linee di forza"* di questo flusso.

Ma il *"tracciato"* di questi canali e la direzione stessa di *"percorrenza"* variano da punto a punto e da istante a istante a causa dell'influenza combinata di varie cause naturali e artificiali come qui sotto inquadrate.

Cause	**Naturali**	**Artificiali**
- Generatori di campo magnetico costante, variabile o alternato a qualsiasi frequenza.	- La Terra - Il Sole - Lo Spazio interstellare	- Energia elettrica - Radio e Televisione - Energia atomica
- Materiali meglio permeabili al magnetismo che ne deviano il flusso verso di loro.	- Il nucleo centrale della Terra - Giacimenti di ferro	- Tutti quegli oggetti di ferro che costituiscono il micromondo dove ognuno di noi vive

All'**origine del fenomeno** descritto ci sono le cariche elettriche **in movimento**.

ESPERIMENTI DI OERSTED SU CONDUTTORI PERCORSI DA CORRENTE

Si esamina ciò che succede ponendo una bussola sopra e sotto un conduttore percorso o no da corrente elettrica.

L'esame degli esperimenti viene effettuato parallelamente nelle due seguenti posizioni:

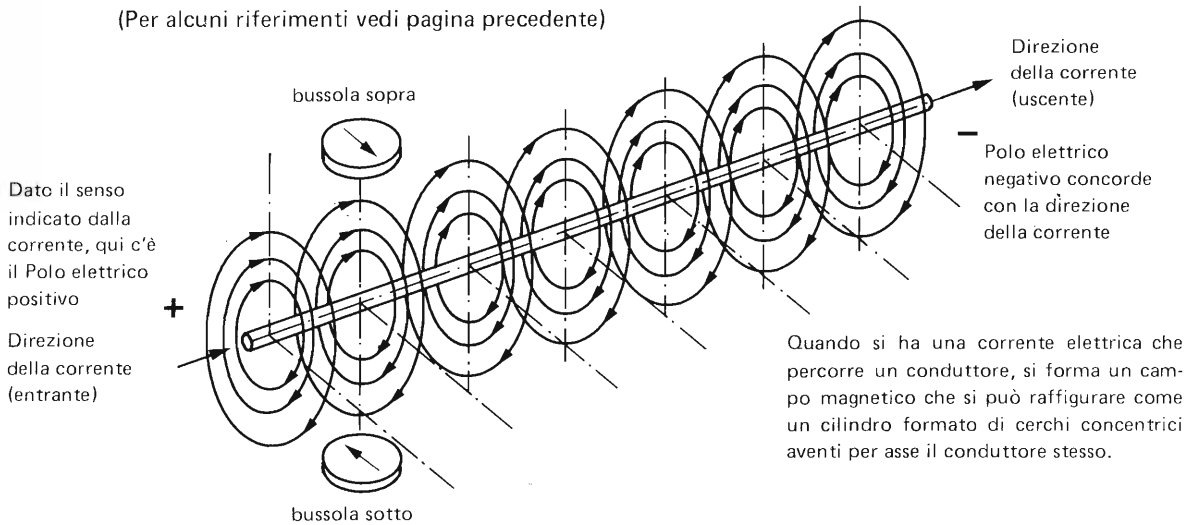
Bussola "sopra" il conduttore | **Bussola "sotto" il conduttore**

Attenzione: Quale senso della corrente si è assunto quello convenzionale delle cariche positive, cioè quello secondo il quale la corrente esce dal polo positivo del generatore ed entra nel polo positivo dell'utilizzatore.

LA CORRENTE ELETTRICA GENERA CAMPO MAGNETICO

Si illustra la più importante conclusione dell'esperienza di Oersted e si stabiliscono alcune norme convenzionali universali.

Campo e circuito magnetico

(Per alcuni riferimenti vedi pagina precedente)

La direzione del campo è quella oraria per chi vede la corrente dalla parte entrante del conduttore.

Simboli convenzionali - per l'interpretazione proiettiva dei disegni.

Le dizioni *"entrante"* e *"uscente"* si riferiscono al piano di vista del presente foglio.

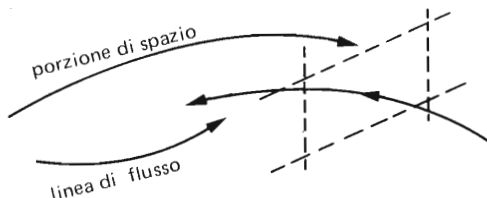
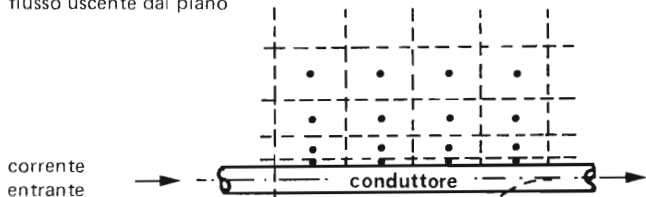
SEGNI CONVENZIONALI PER LA DIREZIONE DELLA CORRENTE ELETTRICA E DEL CONSEGUENTE FLUSSO MAGNETICO

Charificazione di alcuni concetti per facilitare l'apprendimento degli argomenti che seguono.

Nel dominio dell'elettronica è ben raro che le cariche si muovano da sole o che siano concentrate in un punto.

Perciò è inutile andare a cercarsi le linee di flusso perchè non esistono, in quanto il campo magnetico è distribuito con continuità nello spazio circostante alle cariche in movimento, anche esse distribuite con continuità nel conduttore.

L'intensità del campo magnetico sarà maggiore nei punti più vicini alla carica elettrica in movimento e andrà diminuendo nei punti man mano più lontani.

Noi poveri mortali dobbiamo pure trovare una rappresentazione simbolica e concentriamo idealmente tutto il flusso magnetico che attraversa una porzione di piano dello spazio circostante perpendicolare alla direzione del flusso

I puntini significano flusso uscente dal piano

Conduttore ripiegato percorso da corrente

corrente entrante

conduttore

Senso convenzionale della direzione del flusso magnetico in base alla direzione convenzionale della corrente

La crocetta al centro della sezione del conduttore significa corrente entrante

+ polo elettrico positivo

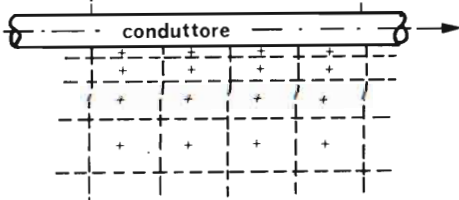
polo elettrico negativo —

Il puntino al centro della sezione del conduttore significa corrente uscente

corrente entrante

conduttore

corrente uscente.

Le crocette significano flusso entrante nel piano

Ogni puntino ed ogni crocetta rappresentano dunque una porzione di flusso opportunamente orientata.
Se ogni punto od ogni crocetta rappresentano un'uguale quantità di flusso, esse verranno segnate diradandesi, allontanandosi dal conduttore poichè anche il flusso stesso diminuisce d'intensità, man mano che si trova più lontano dal conduttore.

CONCETTO DI FORZA MAGNETOMOTRICE - POLI MAGNETICI

Se il flusso magnetico è come una *"corrente"* statica, dovrà ben esistere una sorgente di energia che lo genera, cioè una specie di forza elettromotrice per il magnetismo, cioè una

forza magnetomotrice

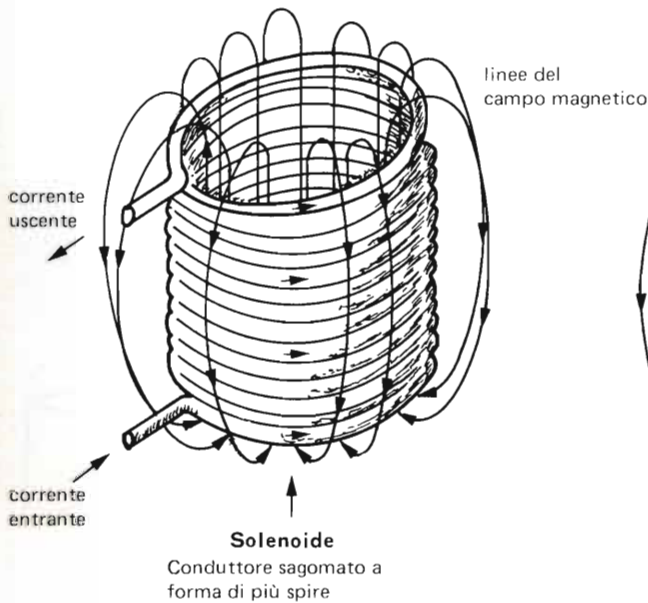
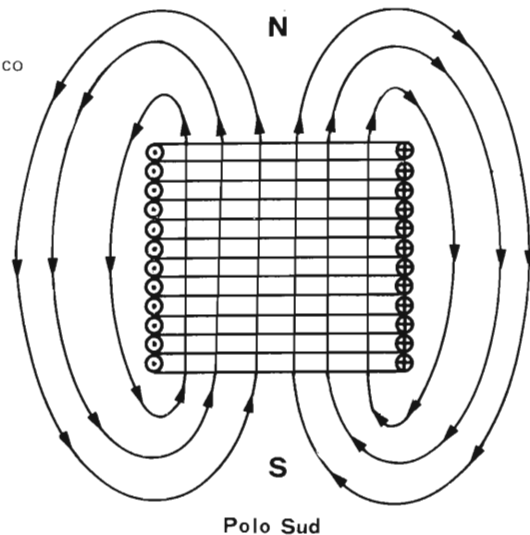
Come per la forza elettromotrice si è stabilita una polarità positiva e negativa, stabiliremo una polarità anche per la forza magnetomotrice.

Facciamo intanto le seguenti osservazioni:

In un conduttore sagomato a forma di spira e attraversato da corrente .....

Rappresentazione proiettiva in sezione della figura a lato

..... Il campo magnetico è equiverso nel suo interno e si chiude all'esterno uniformemente tutto intorno (a mantello).

Solenoide
Conduttore sagomato a forma di più spire

Il campo elettrico in un solenoide ha la stessa direzione di quella posseduta da ogni spira.

Per quanto concerne l'intensità, il contributo di ogni spira è indipendente dalle altre spire e perciò in un solenoide l'intensità del campo è proporzionale al numero di spire oltre che alla corrente.

Polo Nord

Polo Sud

Polarità

Chiameremo:

Polo **Nord** - quella parte del solenoide dalla quale escono le linee di flusso

Polo **Sud** - quella parte del solenoide nella quale entrano le linee di flusso

INTENSITA' E UNITA' DI MISURA DELLA FORZA MAGNETOMOTRICE

Stabilita la polarità della forza magneto-motrice dobbiamo ora esaminare una relazione semplice che ne stabilisca l'intensità.

Visti gli accenni fatti negli argomenti precedenti, possiamo concludere che è matematicamente assodato e sperimentalmente confermato che l'intensità della forza magneto-motrice è proporzionale a due fattori:

1) - il numero delle spire del solenoide

2) - l'intensità di corrente che circola nelle spire.

Si è chiamata col nome di **Amperspira (Asp)** l'unità di misura della forza magneto-motrice, (f.m.m.).

Essa è unitariamente definita come:

l'unità di forza magneto-motrice dovuta alla corrente di 1 Amp. che circola in un solenoide formato da 1 spira

Oltre che facendo passare 1 A in 1 spira, la f.m.m. di 1 Asp si crea anche ad esempio

facendo passare	**5**	**mA**	**in**	**200**	**spire**	
oppure	**1**	**mA**	**in**	**1000**	**spire**	
oppure	**30,3**	**mA**	**in**	**33**	**spire**	
oppure	**16**	**mA**	**in**	**62,5**	**spire**	ecc.

In generale, quindi, il valore della f.m.m. è dato dal prodotto:

$$F = N\,I$$

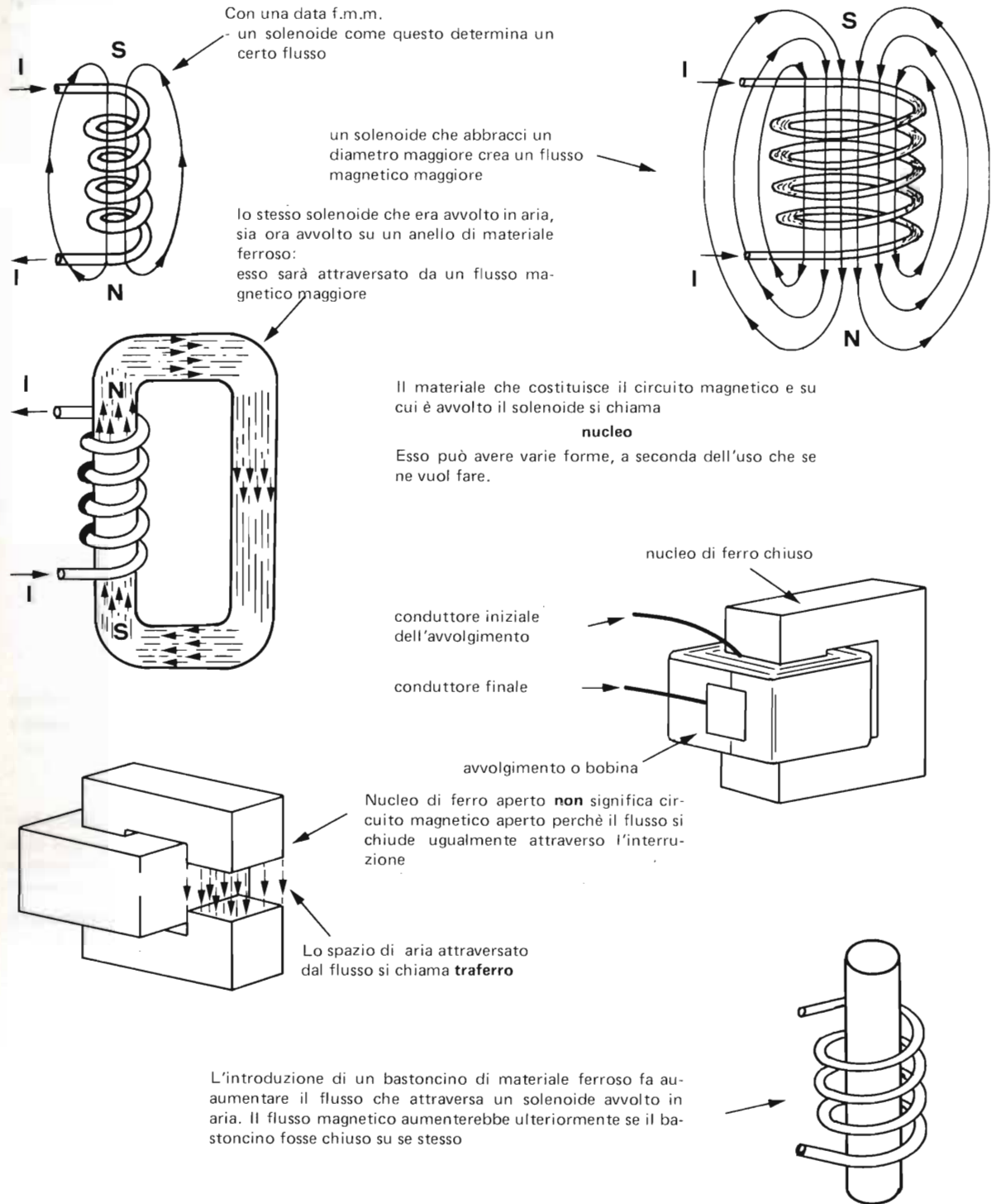
Per chiarire le idee è meglio ripetere che:

la forza magneto-motrice di un solenoide (o bobina, o avvolgimento) dipende unicamente dal numero di spire e dalla corrente che vi circola.

Essa non dipende nè dalla distanza delle spire (passo dell'avvolgimento) che influenza solo una grandezza che si chiama forza magnetica (Amperspire/metro), nè dal diametro delle spire nè dal materiale su cui è avvolto il solenoide, che influenzano unicamente una grandezza che si chiama flusso e che verrà trattata negli argomenti che seguono.

CONCETTO DI FLUSSO MAGNETICO

Un circuito magnetico *"aperto"*, cioè che esista una f.m.m. senza che da questa si generi una specie di *"corrente"* magnetica, non è immaginabile, perchè non esistono materiali *"isolanti"* al magnetismo: la stessa aria ed anche il vuoto chiudono su di sè la f.m.m. generata da un solenoide nel quale circola la corrente elettrica.

Questa permeabilità al magnetismo crea quella specie di corrente magnetica che si chiama **flusso magnetico**.

UNITA' DI MISURA DEL FLUSSO MAGNETICO

Non è facile definire l'unità di misura di flusso magnetico.

Dobbiamo ricorrere a concetti che verranno illustrati più avanti.

E' stato facile definire l'unità di misura per la corrente elettrica partendo dal concetto di carica elettrica che si muove in un conduttore.

Nel flusso magnetico (simbolo Φ), invece, malgrado i tentativi, sempre utili, di analogia con la corrente elettrica, non c'è niente che si muove.

Pertanto i concetti di quantità di magnetismo e di flusso magnetico si identificano.

Si potrebbe prendere un campione di materiale ferromagnetico di determinata lunghezza e di determinata sezione, chiuso ad anello su se stesso e concatenato con un solenoide.

Creata col solenoide la f.m.m. di 1 Asp si potrebbe definire come unitario il flusso che si genera in questo circuito magnetico.

Le difficoltà sorgono quando si devono paragonare, per misurarli, flussi incogniti con questo campione unitario.

Il modo più comodo, in quanto meno difficoltoso, è quello di misurare l'importante effetto di induzione elettromagnetica: quello della generazione di forze elettromotrici a causa di variazione di flusso magnetico.

Se ho modo di far diminuire fino a zero il flusso di cui voglio misurare l'intensità, si genera una forza elettromotrice ai capi di un conduttore concatenato con quel campo magnetico.

Pertanto la definizione dell'unità di misura di flusso magnetico che si chiama

weber (simbolo **Wb**)

è la seguente:

> **Un weber corrisponde a quella quantità di flusso magnetico che, attraversando un circuito elettrico costituito da una sola spira, genera in esso una f.e.m. di 1 volt, quando quel flusso stesso si riduce a zero uniformemente in un secondo.**

In altre parole, se, riducendo a zero in 1 sec., un determinato flusso magnetico che attraversa un circuito formato da una sola spira, e se così facendo, in questo circuito si genera una f.e.m. di 1 volt, è segno che quel flusso era di 1 Wb.

Ovviamente, se, riducendo a zero, sempre in 1 sec., un altro flusso che generi invece una f.e.m. ad esempio di 4,5 V, è segno che quel flusso era di 4,5 Wb.

Se poi quei 4.5 volt vengono ottenuti annullando il flusso in 2 sec., è segno che quel flusso era di 9 Wb.

Infine, se quei 4,5 volt vengono ottenuti attraverso una bobina di 3 spire, annullando il flusso ancora in 2 sec., è segno che quel flusso era di 3 Wb.

Lasciamo tutto all'intuito del lettore, rimandando all'induzione elettromagnetica l'approfondimento di questo problema. (v. par. 12.2).

DEFINIZIONE DELLA LEGGE DI OHM MAGNETICA - RILUTTANZA - PERMEANZA

Si definisce la relazione che intercorre tra forza magneto-motrice e flusso magnetico.

Negli argomenti precedenti si è visto quanto le caratteristiche fisiche e dimensionali del circuito magnetico influiscano quantitativamente sul flusso per una data forza magneto-motrice.

Inoltre, in un dato circuito magnetico si può modificare il flusso, modificando la f.m.m. stessa nel senso che il flusso è direttamente proporzionale ad essa.

Indipendentemente da come esso sia fatto, si può stabilire in un certo circuito magnetico quale rapporto si crea tra f.m.m. e flusso.

Questo rapporto si chiama

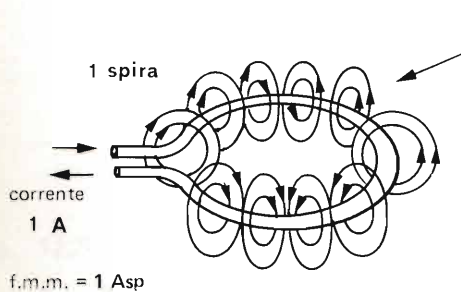
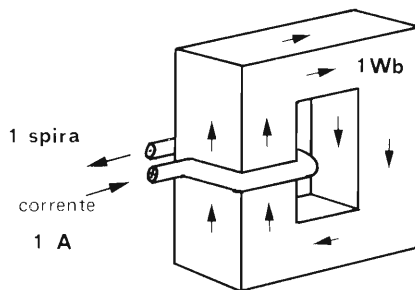
riluttanza (simbolo $\mathcal{R}$)

La sua unità di misura non ha un nome particolare.

La **riluttanza** si definisce in questo modo:

riluttanza in Asp/Wb → $$\mathcal{R} = \frac{F}{\Phi}$$ ← f.m.m. in amperspire (Asp) diviso flusso in weber (Wb)

Questa legge è stata scoperta da Hopkinson e, come si vede, è in perfetta analogia con la legge di Ohm, tanto è vero che è chiamata più comunemente legge di Ohm magnetica.

Essa dice che in un circuito magnetico sottoposto alla f.m.m. di 1 Asp, se si stabilisce un flusso di 1 Wb esso possiede la riluttanza di 1Asp/Wb.

In queste condizioni questo circuito magnetico ha la riluttanza di **1 Asp/Wb**

Anche un circuito magnetico nelle stesse condizioni può possedere la riluttanza di

$$1 \frac{Asp}{Wb}$$

L'inverso della riluttanza si chiama

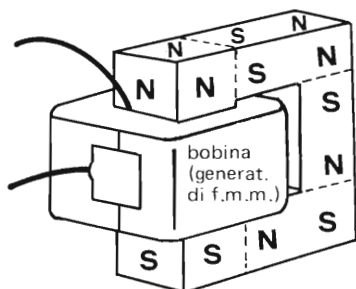
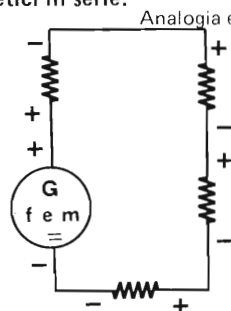
permeanza (simbolo Λ)

e si definisce in questo modo:

permeanza in Wb/Asp → $$\Lambda = \frac{1}{\mathcal{R}} = \frac{\Phi}{F}$$ ← flusso in weber (Wb) diviso f.m.m. in amperspire (Asp)

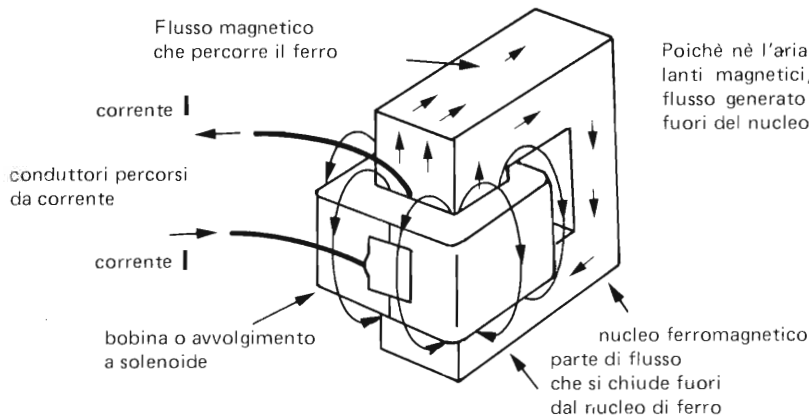
inverso della riluttanza

CONSIDERAZIONI ED ANALOGIE

Un circuito magnetico è composto di infiniti elementi magnetici in serie.

In qualunque parte del circuito magnetico, e anche all'interno della bobina, di fronte ad un polo nord si forma un polo sud e viceversa.

Analogia elettrica

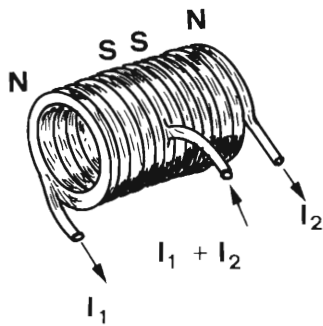
Ad eccezione del generatore le resistenze in serie presentano il polo positivo di fronte al polo negativo della resistenza successiva e viceversa

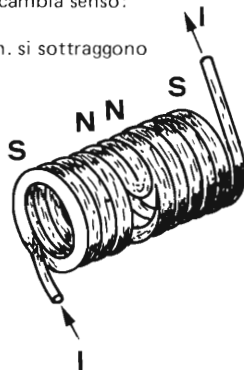
Circuito elettrico scomposto in un numero discreto di resistenze in serie.

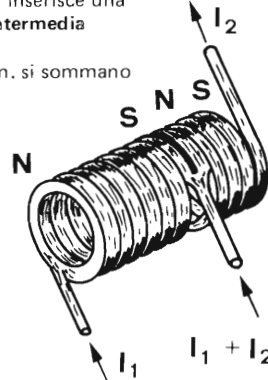
Flusso disperso in un circuito ferromagnetico

Poichè nè l'aria, nè il vuoto sono buoni isolanti magnetici, è inevitabile che parte del flusso generato nella bobina si chiuda al di fuori del nucleo ferromagnetico

Disposizioni circuitali e f.m.m. risultanti

Un'unica spirale con presa intermedia:

le f.m.m. si sottraggono

Dopo alcune spire la bobina cambia senso:

le f.m.m. si sottraggono

Laddove la bobina cambia senso si inserisce una presa **intermedia**

le f.m.m. si sommano

Paragrafo 12.2

ELETTROMAGNETISMO, INDUZIONE ELETTROMAGNETICA

Indice degli argomenti e delle pagine

LE VARIAZIONI DI FLUSSO GENERANO FORZE ELETTROMOTRICI NEI CONDUTTORI CHE LO ATTRAVERSANO

Incominciamo ad avere un'idea dei fenomeni di induzione elettromagnetica.

Abbiamo visto nei precedenti paragrafi che, se una carica elettrica si muove (cioè si è in presenza di corrente elettrica), si genera un campo magnetico circolare attorno alla carica stessa.

Se la carica si muove di moto uniforme (corrente continua di valore costante), il campo magnetico resta costante nella sua intensità.

Se la carica si muove di moto vario o addirittura inverte il suo moto (corrente variabile unidirezionale e corrente alternata), si ottiene un campo magnetico di intensità variabile o che addirittura inverte la sua direzione e la sua polarità.

In questo paragrafo esamineremo come:

- la variazione di flusso magnetico (campi magnetici variabili in generale)
- il movimento di un conduttore in un campo magnetico qualsiasi

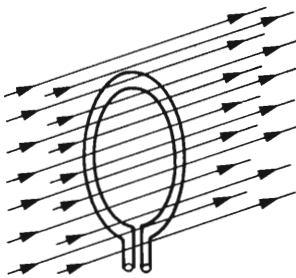
generano una forza elettromotrice nel conduttore stesso.

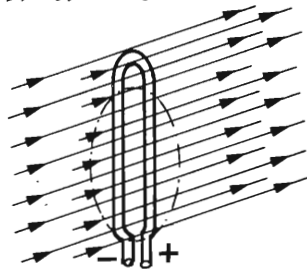
Meditiamo un po' su questo affascinante fenomeno della natura di cui l'uomo si è impadronito per comunicare a grandi distanze e per manipolare i fattori dell'energia.

I fenomeni elettromagnetici sono così concatenati:

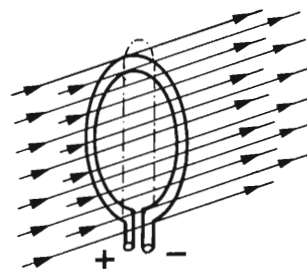
1) La f.e.m. alternata si chiude su un circuito e genera corrente alternata
2) La corrente alternata genera un campo magnetico alternato
3) Il campo magnetico alternato genera una f.e.m. alternata

1) Si ricomincia daccapo.

Illustrazione del fenomeno della induzione elettromagnetica

Spira di materiale conduttore immersa in un campo magnetico costante.

La direzione del flusso magnetico attraversa perpendicolarmente il piano della spira.
La superficie della spira abbraccia una certa quantità di flusso.

Stessa spira schiacciata in modo che la sua superficie diminuisca.

Durante la deformazione, cioè **durante** la variazione di superficie della spira si ha una variazione di flusso (cioè si abbraccia sempre meno flusso).

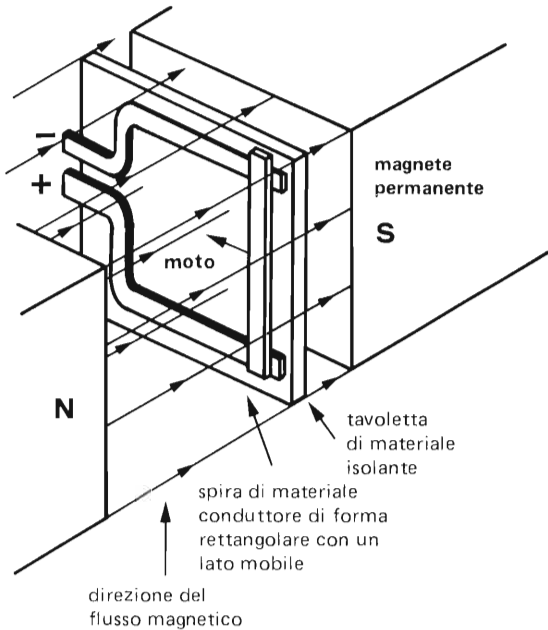
A causa della **variazione di flusso** (in diminuzione) **si genera una forza elettromotrice** ai capi della spira.

Stessa spira riportata alle condizioni iniziali in modo che la sua superficie aumenti.

Durante la variazione di superficie della spira (questa volta in aumento) si ha una variazione di flusso (cioè si abbraccia sempre più flusso).

A causa della **variazione di flusso** (in aumento) **si genera una forza elettromotrice** di segno contrario alla precedente ai capi della spira.

Un altro modo di ottenere una f.e.m. senza deformare la spira è quello di far ruotare la spira attorno al suo asse di simmetria.

VARIAZIONE DI FLUSSO PRODOTTA COL MOVIMENTO DI UN CONDUTTORE

Si dimostra come il movimento di un conduttore immerso in un campo magnetico assomigli alla deformazione di una spira e quindi sia soggetto allo stesso fenomeno che corrisponde alla variazione del flusso abbracciato dalla spira stessa.

Su una tavoletta di materiale isolante si costruisca una spira di materiale conduttore di forma rettangolare con un lato mobile.

Si immerga tutto in un campo magnetico la cui direzione sia perpendicolare alla superficie della spira.

Data la direzione del campo magnetico indicata in figura, muovendo il conduttore mobile nella direzione pure indicata, si forma ai capi della spira una forza elettromotrice di cui è indicata in figura la polarità.

E' chiaro che tutta la messa in scena della spira rettangolare è solo un pretesto dimostrativo: infatti il fenomeno si verifica anche con il solo conduttore in movimento.
(v. figure qui sotto)

Constatare come si formano le polarità elettriche invertendo il moto del conduttore o la direzione del campo

Su questo principio si basa il funzionamento di:

- macchine elettriche rotanti
- microfoni magnetici
- testine fonografiche.

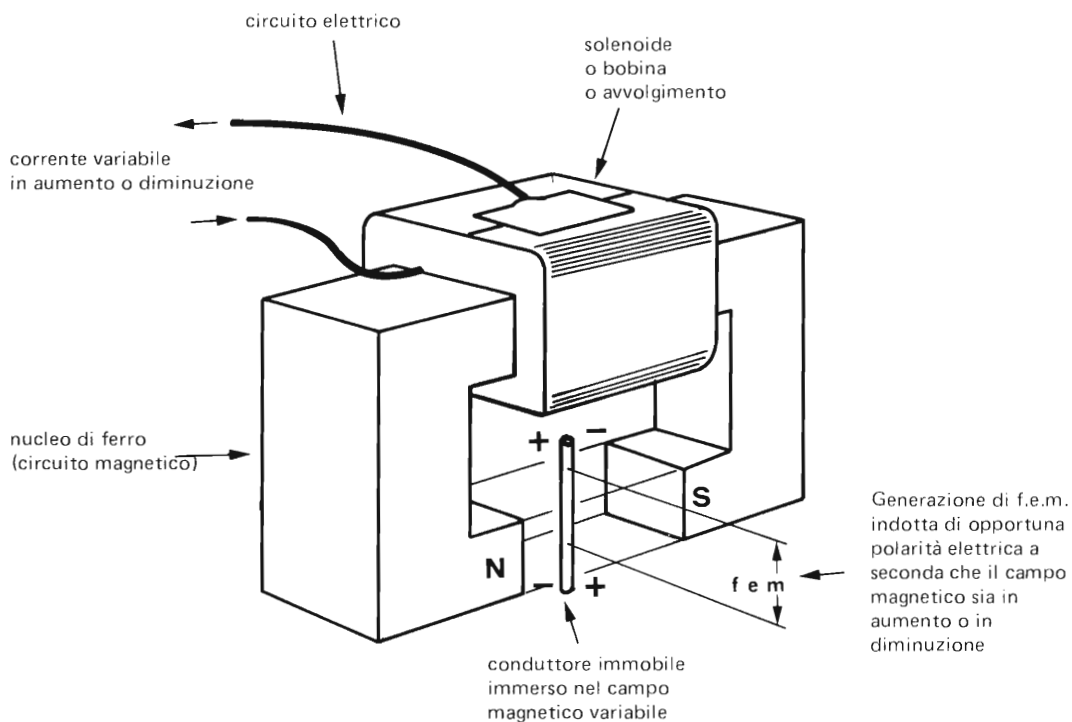
VARIAZIONE DI FLUSSO PRODOTTA MODIFICANDO LA F.M.M.

Un secondo modo di generare forze elettromotrici indotte è quello di far variare il flusso magnetico facendo variare la forza magneto-motrice nel circuito magnetico.

Abbiamo visto al paragrafo precedente che la f.m.m. dipende direttamente dal numero di spire del solenoide (bobina) o dalla intensità di corrente che lo percorre.

Per far variare la f.m.m. è sufficiente perciò far variare l'uno e l'altro dei due fattori.

E' intuitivo che il modo più scomodo sarebbe quello di far variare il numero delle spire!

E' più facile modificare la forza magneto-motrice facendo percorrere l'avvolgimento da una corrente variabile.

Attenzione - La f.e.m. ai capi del conduttore si produce solo quando ci sia **variazione di flusso**, che, in questo caso, è ottenuta mediante **variazione di forza magneto-motrice** nel circuito magnetico e perciò, in ultima analisi, mediante **variazione di corrente** (che si chiama corrente magnetizzante).

La presenza di **flusso costante** cioè di **f.m.m. costante** ed, in ultima analisi, ancora **corrente costante** (corrente continua e costante).

NON PRODUCE F.E.M.

ai capi del conduttore immobile ed immerso nel campo magnetico.

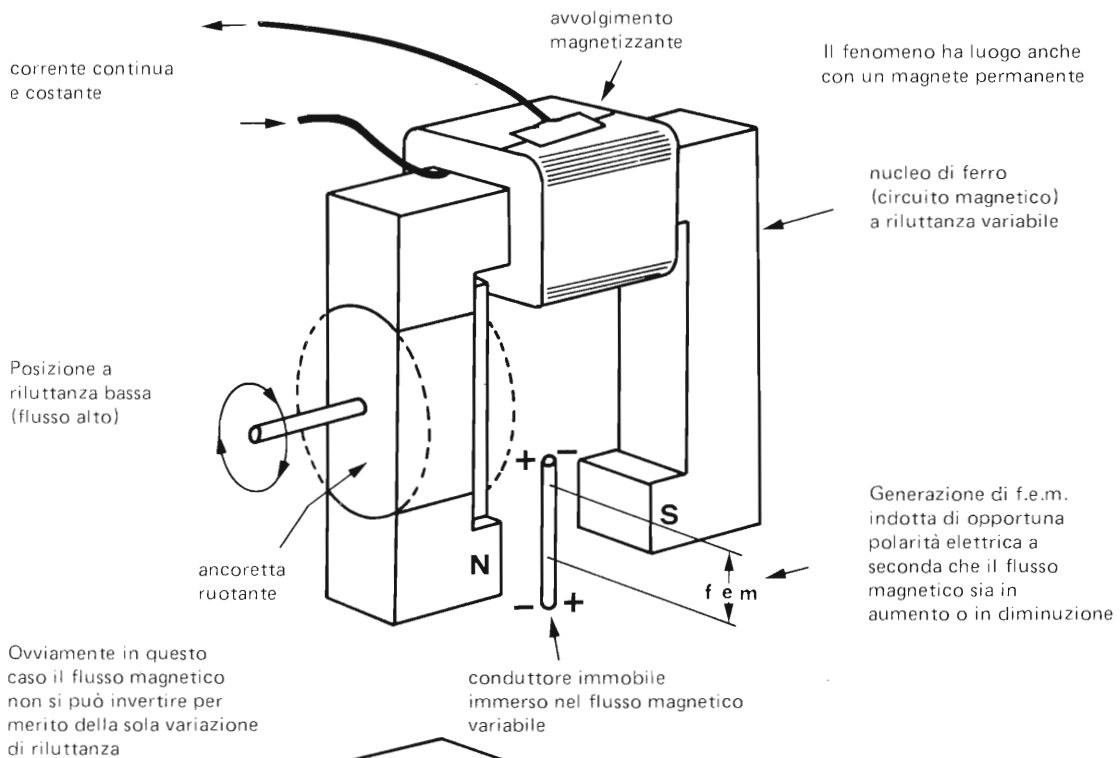
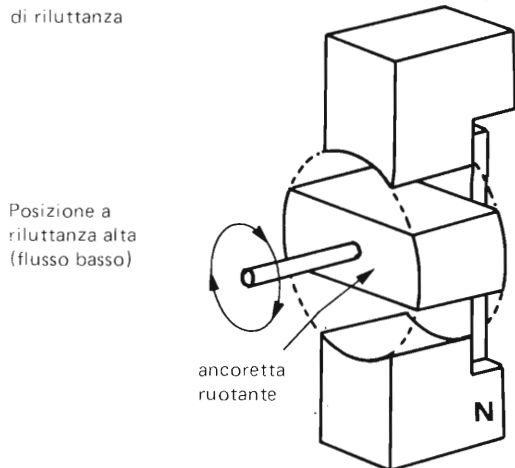
Su questo principio si basa il funzionamento di:

- macchine elettriche statiche (trasformatori)
- induttanze
- ecc.

VARIAZIONE DI FLUSSO PRODOTTA MODIFICANDO LA RILUTTANZA

Un terzo modo di generare forze elettromotrici indotte è quello di far variare il flusso magnetico facendo variare la riluttanza nel circuito magnetico.

Abbiamo visto al paragrafo precedente che il flusso magnetico dipende dalla riluttanza del circuito per una data f.m.m..

Esamineremo in questo caso come si possa far variare la riluttanza di un circuito magnetico per ottenere una f.e.m. indotta ai capi di un conduttore immobile che si trovi immerso in questo campo magnetico.

Attenzione

La f.e.m. ai capi del conduttore si produce solo quando ci sia **variazione di flusso** che in questo caso è ottenuta mediante **variazione di riluttanza**.

La presenza di **flusso costante** che si otterebbe se l'ancoretta cessasse di ruotare,

NON PRODUCE F.E.M.

ai capi del conduttore immobile e immerso nel flusso magnetico.

Su questo principio si basa il funzionamento di:

- macchine elettriche speciali (generatori di tensioni di riferimento per strumenti speciali come tachimetri, torsiometri, ecc.)
- microfoni elettromagnetici

VALORE DELLA F.E.M. INDOTTA IN GENERALE

Si enuncia e si commenta la relazione che lega il valore della f.e.m. indotta con il valore della variazione del flusso.

Negli argomenti immediatamente precedenti abbiamo esaminato qualitativamente in quanti modi si può creare una variazione di flusso per ottenere una f.e.m. indotta ai capi di un conduttore che si trovi immerso in quel flusso magnetico.

Riassumiamoli:

1) Flusso costante; conduttore in movimento in modo da attraversarlo.
2) Flusso variabile a mezzo di variazione di f.m.m.; conduttore immobile.
3) Flusso variabile a mezzo di variazione di riluttanza; conduttore immobile.

Vediamo ora quantitativamente qual'è la relazione che lega il valore della variazione di flusso magnetico con il valore della f.e.m. indotta ai capi del conduttore.

La legge sperimentata da Lenz è molto semplice ed è la seguente:

Si osservi dunque quanto non la sola variazione di flusso influisca sul valore della f.e.m. indotta, ma la **rapidità** con la quale la variazione avviene.

Dunque il fenomeno è anche legato inversamente al tempo.

Il segno meno serve solo a mettere d'accordo il fenomeno con la direzione convenzionale della f.e.m..

Nei calcoli pratici esso non ha molta importanza e lo si trascura, ma non bisogna dimenticare che c'è, se non si vogliono avere delusioni nei calcoli teorici.

Negli argomenti che seguono si adatterà l'espressione universale di Lenz ai vari fenomeni riassunti all'inizio di questa pagina e illustrati negli argomenti precedenti.

Attenzione - Cominceremo a sentire parlare di **induzione magnetica** che altro non è che una densità di flusso magnetico e che si misura in Wb/m^2 (weber al metro quadrato).

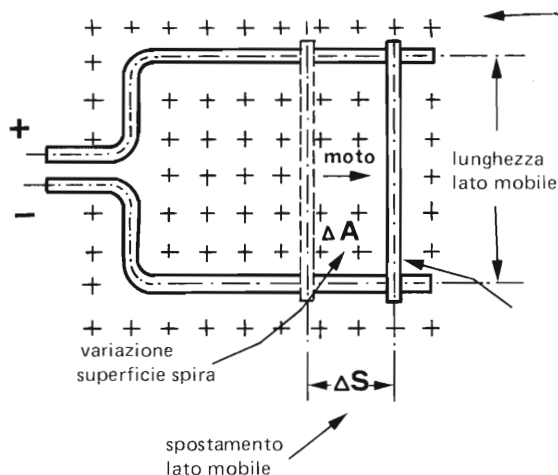
Per determinarla è semplice

induzione magnetica (in Wb/m^2) → $B = \frac{\Phi}{A}$ ← flusso magnetico (in Wb) diviso superficie (in m^2) attraversata da quel flusso

Attenzione a non confondere l'induzione elettromagnetica che è il fenomeno di cui ci stiamo occupando con l'induzione magnetica che è una grandezza specifica di flusso magnetico.

VALORE DELLA F.E.M. INDOTTA IN UN CONDUTTORE IN MOVIMENTO

Si adatta l'espressione universale di Lenz esprimendo la variazione $\Delta\Phi$ del flusso magnetico in funzione del movimento di un conduttore che lo tagli perpendicolarmente.

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

Una spira di materiale conduttore abbia le seguenti caratteristiche:

a) forma rettangolare con un lato mobile
b) attraversata da flusso magnetico entrante nella pagina del foglio e di densità (induzione magnetica) uniforme **B** in Wb/m^2.

La spira abbraccia più flusso nella misura in cui il lato di lunghezza **l**, spostandosi nella direzione della freccia, aumenta la superficie di spira attraversata dal flusso stesso.

La variazione di superficie della spira è: (in m^2)

$$\Delta A = l\ \Delta S$$

ΔS ← spostamento lato mobile in m.
l ← lunghezza lato mobile in metri

Poichè la densità di flusso (induzione magnetica) **B** (in Wb/m^2) è uniforme, avremo:

variazione di flusso (in Wb) $\Delta\Phi = B \cdot \Delta A = B\ l\,\Delta S$

induzione magnetica (in Wb/m^2) → B; variazione di superficie della spira (in m^2) → ΔA

Vediamo ora come si trasforma l'espressione di Lenz

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = -\frac{B\,l\,\Delta S}{\Delta t}$$

← questo rapporto (circondato da punteggiatura) ha le dimensioni di una **velocità v** (in m/sec.)

E finalmente l'espressione di Lenz per un conduttore in movimento in un campo magnetico:

$$E = B\,l\,v$$

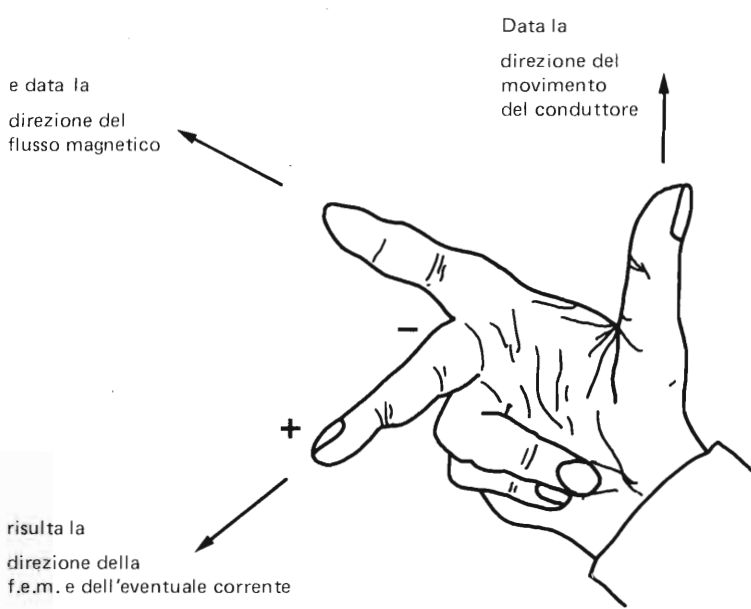
- forza elettromotrice indotta (in volt) → E
- velocità (in m/sec.) di spostamento del conduttore perpendicolarmente alla direzione del flusso → v
- densità di flusso (induzione magnetica) (in Wb/m^2) → B
- lunghezza (in metri) della parte di conduttore realmente attraversata dal flusso e intercettata dalla spira → l

Interessante - La polarità elettrica della f.e.m. è tale che, chiudendo la spira su un carico, si genera una corrente che crea a sua volta un campo magnetico che si oppone a quello principale con una forza (reazione) tale, da creare, col movimento del conduttore, la stessa energia che si accumula o si dissipa nel carico a seconda della sua natura.

Non poteva essere diversamente: anche qui il principio di conservazione dell'energia deve farsi rispettare.

REGOLA MNEMONICA DELLA MANO DESTRA

Sarebbe difficile tenere a mente il meccanismo che governa la formazione della polarità della f.e.m. indotta in un conduttore in movimento che taglia le linee del flusso, se non si ricorresse alla seguente regola mnemonica.

Regola di Fleming o della mano destra per la determinazione della direzione della f.e.m. indotta (ricordare: destra ha la stessa iniziale D come dinamo cioè generatore).

Le direzioni delle seguenti tre grandezze:

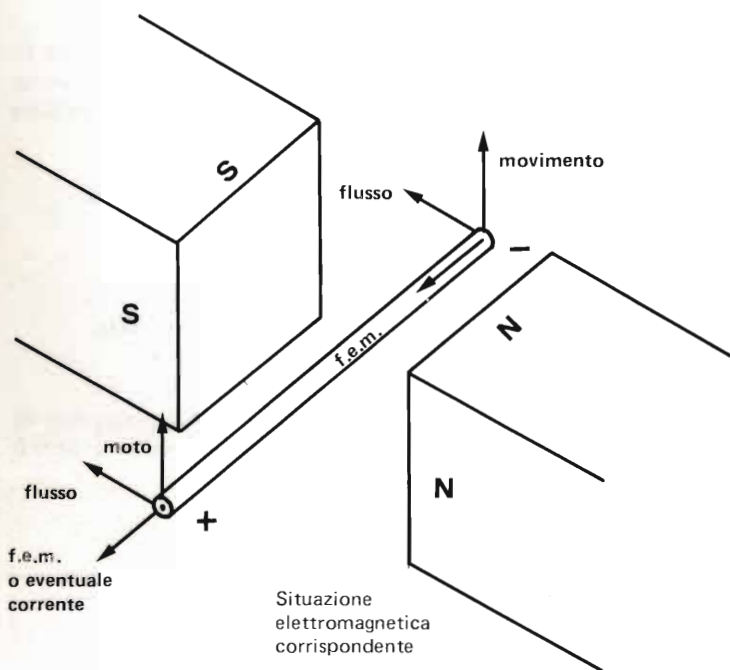
1) movimento del conduttore
2) flusso magnetico
3) polarità della f.e.m. (e direzione della eventuale corrente)

sono perpendicolari fra loro.

Le dita della mano destra siano disposte secondo tre direzioni perpendicolari.

Ogni dito indicherà la direzione di una grandezza come segue:

pollice = movimento
indice = flusso
medio = f.e.m.

Situazione elettromagnetica corrispondente

Altra regola mnemonica:

- sequenza delle dita

  pollice - indice - medio

- sequenza corrispondente delle grandezze

  meccanica - magnetica - elettrica

- inpostate queste due come dati — si ha questa come risultato

CONDUTTORE IN MOVIMENTO IN POSIZIONE NON PERPENDICOLARE AL FLUSSO

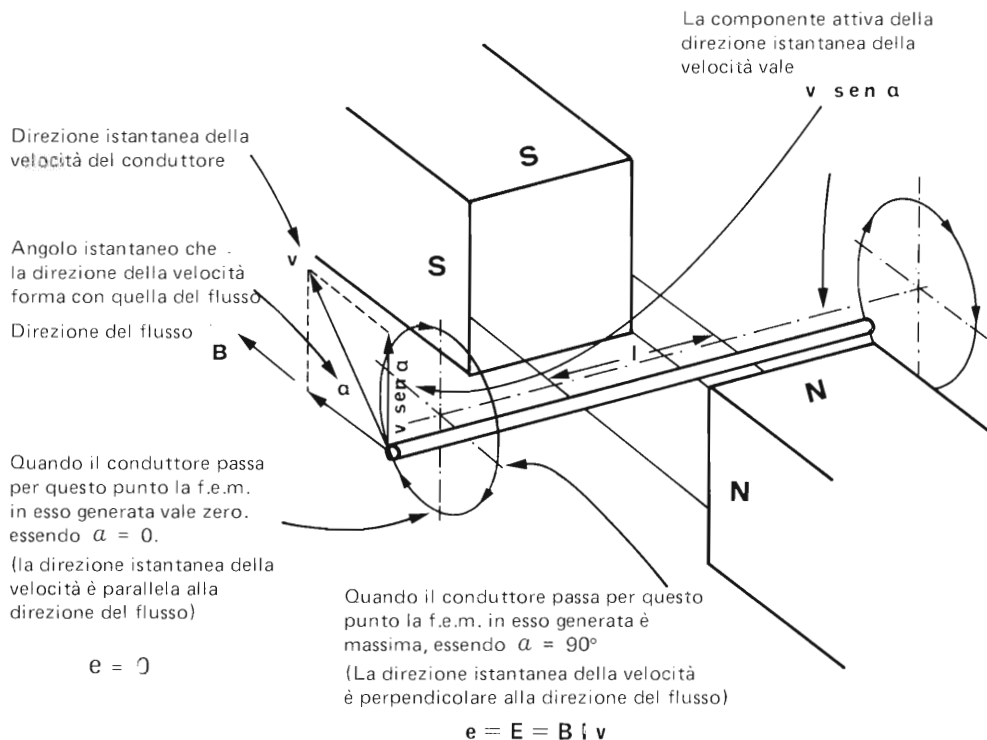
La f.e.m. indotta corrisponde sempre al valore della componente perpendicolare al flusso della direzione del conduttore o di quella del suo movimento quando sia l'una che l'altra formano con la direzione del flusso angoli diversi da 90° ($\frac{\pi}{2}$ rad.)

$E = B\,l\,v\,\text{sen}\,\alpha$

2) Movimento del conduttore non perpendicolare al flusso conduttore in posizione perpendicolare

MOVIMENTO ROTATORIO DI UN CONDUTTORE ATTORNO AD UN ASSE PERPENDICOLARE ALLA DIREZIONE DEL FLUSSO

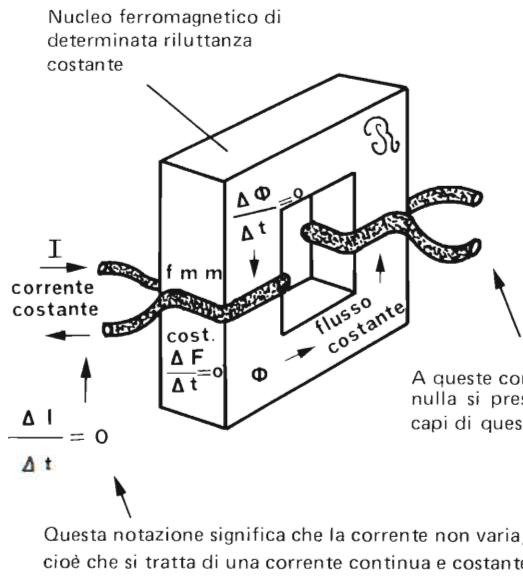
La f.e.m. indotta corrisponde sempre al valore della componente perpendicolare alla direzione del flusso.

Nel movimento rotatorio questo valore cambia continuamente secondo una semplice legge trigonometrica sinoidale.

Se chiamiamo $E = B\, l\, v$ la f.e.m. massima, cioè quella che si ottiene quando $\alpha = 90°$, cioè quella che si ha istantaneamente quando il conduttore taglia perpendicolarmente la direzione del flusso, in un punto qualsiasi della circonferenza descritta da un'estremità del conduttore avremo

Se vogliamo legare l'angolo α alla velocità angolare o pulsazione (in rad/sec.) del movimento circolare, essendo $\alpha = \omega\, t$ scriveremo:

VALORE DELLA F.E.M. INDOTTA IN UN CAMPO A F.M.M. VARIABILE

Dopo un esame sull'inattività di un campo magnetico stazionario, cioè senza variazioni di f.m.m., si passa allo studio degli interessanti fenomeni di f.e.m. indotta che si ottengono facendo variare la f.m.m.

A) Flusso costante, generato da f.m.m. costante, non induce alcuna f.e.m.

Se in una **spira** di materiale conduttore avvolta attorno ad un circuito ferromagnetico (nucleo) faccio passare una corrente continua e costante **I** nel circuito magnetico si genera una f.m.m.

f.m.m. (in Asp). → $F = I$ ← corrente (in Amp.)

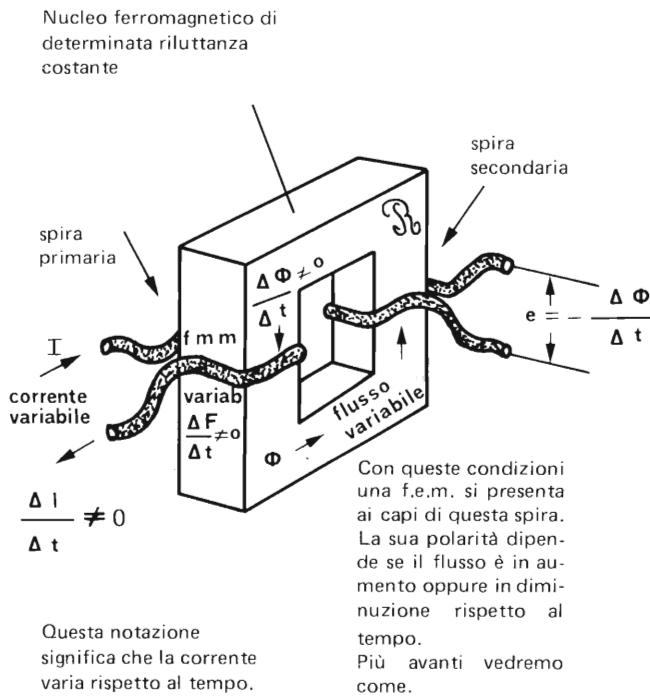
A causa di questa f.m.m. nel nucleo si genera un flus-

flusso (in Wb) → $\Phi = \frac{F}{\mathcal{R}}$ ← f.m.m. (in Asp.)

riluttanza (in Asp/Wb)

Questo flusso resta costante (non varia), perchè:

1) costante è la riluttanza nella quale esso circola
2) costante è la f.m.m. che lo genera, poichè
3) costante è la corrente che genera la f.m.m.

B) Flusso variabile, generato da f.m.m. variabile, induce una f.e.m.

Se la corrente che circola nella spira, che chiameremo primaria, è variabile secondo un andamento di cui conosciamo le **variazioni** $\Delta I/\Delta t$ rispetto al tempo, ai capi della spira secondaria si genera una **f.e.m.** proporzionale all'entità delle variazioni.

Essendo fissa la riluttanza $\mathcal{R}$ del circuito magnetico, il flusso dipenderà unicamente dall'andamento della f.m.m. e quindi dalla corrente **I** che la genera.

La stessa f.e.m. si genera **anche** ai capi della spira ra primaria, poichè anch'essa abbraccia lo stesso **flusso variabile**, che attraversa la spira secondaria.

Chiameremo le espressioni

$\frac{\Delta I}{\Delta t}$ rapidità di variazione della corrente (Amp/sec.)

$\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}$ rapidità di variazione del flusso (Wb/sec)

F.E.M. INDOTTA IN UN SOLENOIDE A PIU' SPIRE

Dimostreremo che le f.e.m. induttrici (magnetizzanti) e indotte stanno fra loro come le loro stesse spire.

A) Avvolgimento primario di una spira, secondario di più spire

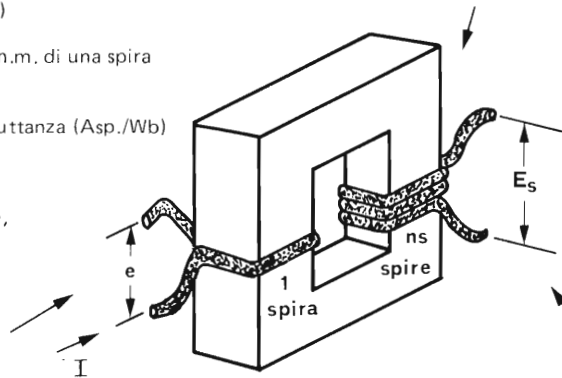
Flusso magnetico (in Wb)

$$\Phi = \frac{I}{\mathcal{R}}$$

← f.m.m. di una spira

← riluttanza (Asp./Wb)

La corrente **I** è variabile, perciò (vedi argomento precedente) ai capi della spira si autoinduce una f.e.m.

$$e = -\frac{\Delta\ \Phi}{\Delta\ t}$$

Anche in **ogni spira** del secondario si induce una f.e.m.

$$e = -\frac{\Delta\ \Phi}{\Delta\ t}$$

Perciò ai capi di **tutte le n_s spire** del secondario si avrà una f.e.m. $E_s = n_s$ e cioè:

$$E_S = -\ n_S\ \frac{\Delta\ \Phi}{\Delta\ t}$$

B) Avvolgimento primario di n_p spire, secondario di n_s spire

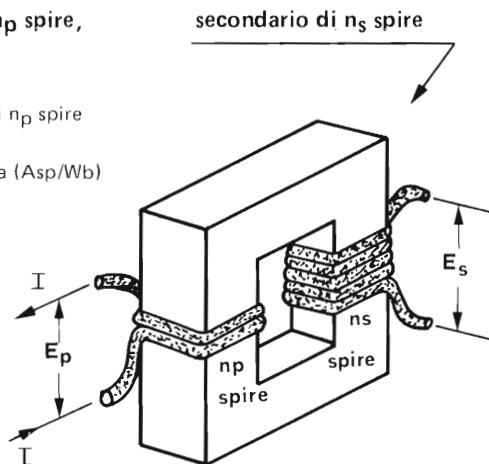
Flusso magnetico (in Wb)

$$\Phi = \frac{n_p I}{\mathcal{R}}$$

← f.m.m. di n_p spire

← riluttanza (Asp/Wb)

La corrente **I** è variabile, perciò ai capi delle spire primarie si autoinduce una f.e.m. totale

$$E_p = -\ n_p\ \frac{\Delta\ \Phi}{\Delta\ t}$$

Per gli stessi motivi la f.e.m. totale che si induce al secondario è:

$$E_S = -\ n_S\ \frac{\Delta\ \Phi}{\Delta\ t}$$

C) Studio della relazione che lega i valori delle forze elettromotrici primaria e secondaria col relativo numero di spire.

E' sufficiente fare il rapporto fra le due f.e.m. precedentemente calcolate

f.e.m. primaria → E_p

f.e.m. secondaria → E_s

$$\frac{E_p}{E_s} = \frac{-n_p \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}}{-n_s \dfrac{\Delta\Phi}{\Delta t}}$$

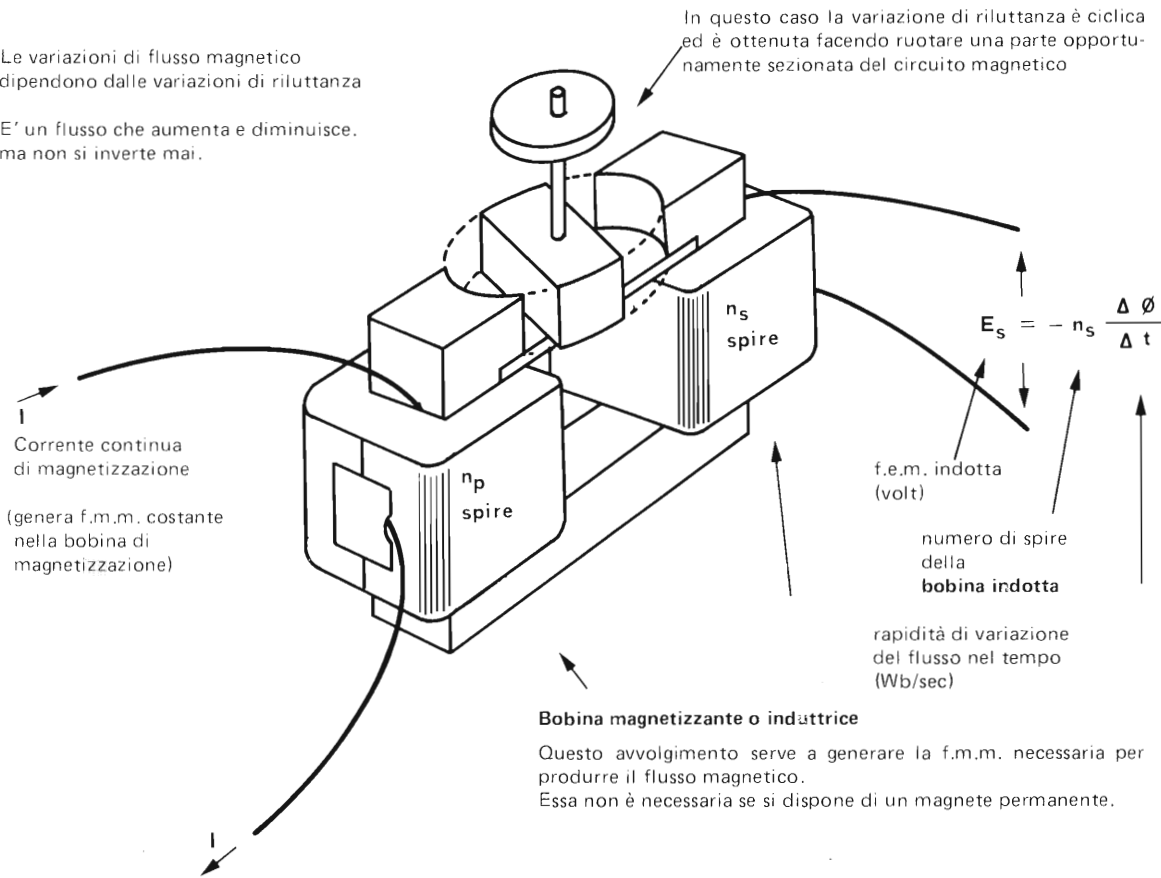
Semplificando si ottiene:

f.e.m. primaria diviso f.e.m. secondaria → $\frac{E_p}{E_s} = \frac{n_p}{n_s}$ ← numero di spire primarie diviso numero di spire secondarie

La f.e.m. primaria si chiama anche **forza contro-elettromotrice** (f.c.e.m.) perchè si oppone alla f.e.m. variabile $\Delta E/\Delta t$ proveniente dal generatore che provoca le variazioni di corrente $\Delta I/\Delta t$ e quindi le variazioni di flusso $\Delta\Phi/\Delta t$.

★

VALORE DELLA F.E.M. INDOTTA IN UN SOLENOIDE CON RILUTTANZA VARIABILE

Le regole precedentemente esposte valgono comunque venga fatto variare il flusso.
Qui la f.e.m. indotta si ottiene facendo variare la riluttanza del circuito magnetico.

Attenzione - Anche ai capi della bobina magnetizzante si produce una

f.e.m. primaria (in volt) ⟶ $$E_p = - n_p \frac{\Delta \phi}{\Delta t}$$ rapidità di variazione del flusso (in Wb/sec)

↑ numero di spire della bobina induttrice

Questa forza elettromotrice indotta può assumere notevoli valori che dipendono, come si vede, dal numero di spire (che deve essere alto per raggiungere la f.m.m. necessaria con una corrente modesta) e dalla rapidità di variazione del flusso.

Poichè il circuito induttore è chiuso sul generatore di corrente di magnetizzazione, la presenza di questa forza elettromotrice indotta può chiudersi sul generatore stesso e creare notevoli inconvenienti, se non si prendono opportune precauzioni (filtri selettivi ecc.).

L'uso del magnete permanente, rende la costruzione più semplice ed evita anche questi inconvenienti.

Su questo principio si basa il funzionamento di:

- macchine elettriche speciali (generatori di tensioni di riferimento per strumenti speciali come tachimetri, torsiometri, ecc.).
- microfoni, ecc.

MACCHINE ELETTRICHE IN GENERALE

I fenomeni descritti in questo paragrafo 12.2 fino all'argomento precedente (12.23) sono quelli che vengono sfruttati per il funzionamento delle macchine generatrici di energia elettrica (la dinamo, l'alternatore, ecc.).

Ricordiamo sempre che la parola "generare" in natura non può che significare soltanto "trasformare" un tipo di energia esistente in un altro tipo: quella elettrica nel nostro caso.

Per trasformare energia trasmessa alla macchina elettrica in modo meccanico a mezzo della rotazione di un albero è indispensabile usare uno dei due seguenti modi che prevedono movimento per produrre f.e.m. indotta.

Il primo prevede il movimento relativo di un conduttore attraverso un campo magnetico precostituito: è il modo più pratico ed efficace (v. 12.23 pagg. 1, 2, 3) per produrre energia elettrica. Ad esso si ispirano la maggioranza delle macchine elettriche.

Il secondo sfrutta la variazione di riluttanza (v. 12.23-6) ed è usato prevalentemente nel campo della strumentazione particolare per l'effettuazione di speciali misure, e nell'elettronica.

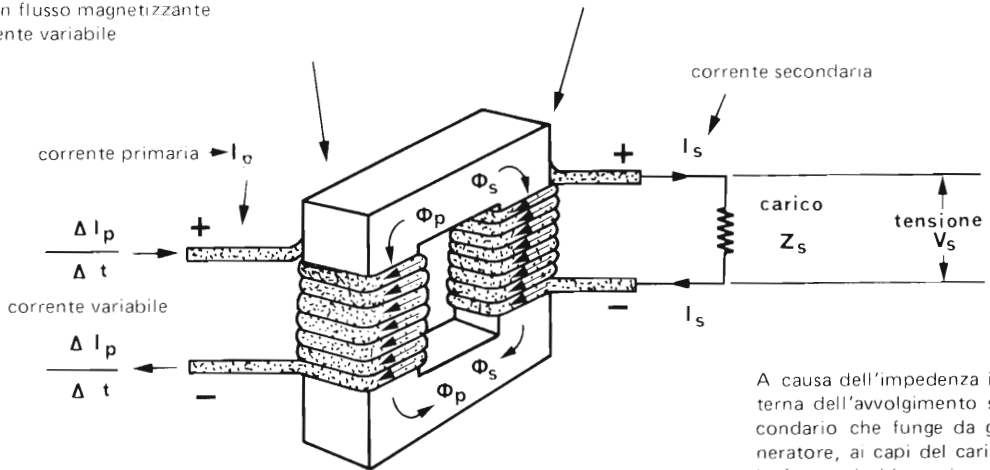
Il modo che non sfrutta alcun movimento, ma che produce f.e.m. mediante un flusso variabile generato da una corrente pure variabile come potrebbe essere una corrente alternata, è largamente usato anche in elettronica e le "macchine" elettriche che lo sfruttano si chiamano **trasformatori**.

La forza elettromotrice, presente ai morsetti di tutte le macchine elettriche citate, è fonte di energia elettrica a tutti gli effetti.

La corrente che si produce se colleghiamo i morsetti ad un carico produce magnetismo nella macchina ed è questo magnetismo che sovrintende ad un gioco di effetti tali da richiamare altrettanta energia dal motore o da fonte elettrica come nel trasformatore.

Questa corrente produce una reazione meccanica nelle macchine rotanti o una smagnetizzazione nei trasformatori così da costringere il motore o il trasformatore stesso a ripristinare le condizioni elettriche imposte dalla sua struttura, richiamando dalla fonte l'energia necessaria.

CORRENTE SMAGNETIZZANTE PRODOTTA DAL SECONDARIO QUANDO E' COLLEGATO AD UN CARICO

Quando l'avvolgimento secondario è collegato ad un carico anch'esso è sede di f.m.m. a causa della corrente che si produce: vediamo cosa succede.

1) La presenza del carico provoca una corrente

$$I_S = \frac{V}{Z_S} \quad \text{(legge di Ohm)}$$

Questa corrente, data la sua direzione inequivocabile (vedi argomenti precedenti), provoca nel circuito magnetico una f.m.m. e quindi un flusso di **direzione opposta** a quello magnetizzante.

Questo **flusso** è detto

smagnetizzante

e la sua intensità dipende dalla corrente secondaria che a sua volta dipende dal valore del carico oltre che, come sappiamo, dalla f.e.m. indotta e quindi dal rapporto spire e dalla rapidità di variazione della corrente primaria.

2) La presenza di un **campo smagnetizzante**, diminuisce il flusso che attraversa il circuito magnetico.

La corrente primaria aumenta per riportare il sistema in una nuova posizione di equilibrio per ripristinare il flusso diminuito, richiamando energia dal generatore.

Ed anche il principio di conservazione dell'energia è salvo ancora una volta, come diversamente non poteva essere.

Cioè, l'energia che serve ad alimentare il carico non può che essere presa da chi ce l'ha: il generatore.

PREMESSA

Il magnetismo prodotto da una corrente elettrica materializza l'energia cinetica di movimento delle cariche accumulata nel circuito magnetico.

Questa energia tende a conservarsi nel corpo di questo dispositivo costituito da spire attraversate da corrente e da flusso magnetico da essa prodotto.

Questa energia non può essere distrutta istantaneamente, semplicemente interrompendo la corrente, tanto è vero che fra i contatti dell'interruttore si forma inevitabilmente una scintilla: segno sensibile di quella energia accumulata che deve trasformarsi in luce e calore per potersi annullare.

Luce e calore di queste scintille sono tali, quando l'energia accumulata è notevole, da creare inconvenienti se non si adattassero opportune misure di protezione.

Il dispositivo di cui stiamo parlando si chiama induttore, e induttanza è la grandezza ad esso relativa che mette in relazione l'energia accumulabile sottoforma magnetica e quella elettrica.

Vedremo in altre parti della trattazione che questa facoltà dell'energia elettrica di accumularsi sottoforma cinetica e quindi magnetica esiste dappertutto in qualsiasi circuito, nelle linee di trasmissione, negli elementi stessi del circuito.

Il parametro induttanza, tanto prezioso dove ci serve, diventa indesiderabile in altri punti del circuito al punto che in particolari condizioni ce ne dobbiamo difendere e dobbiamo studiare accorgimenti per minimizzarlo.

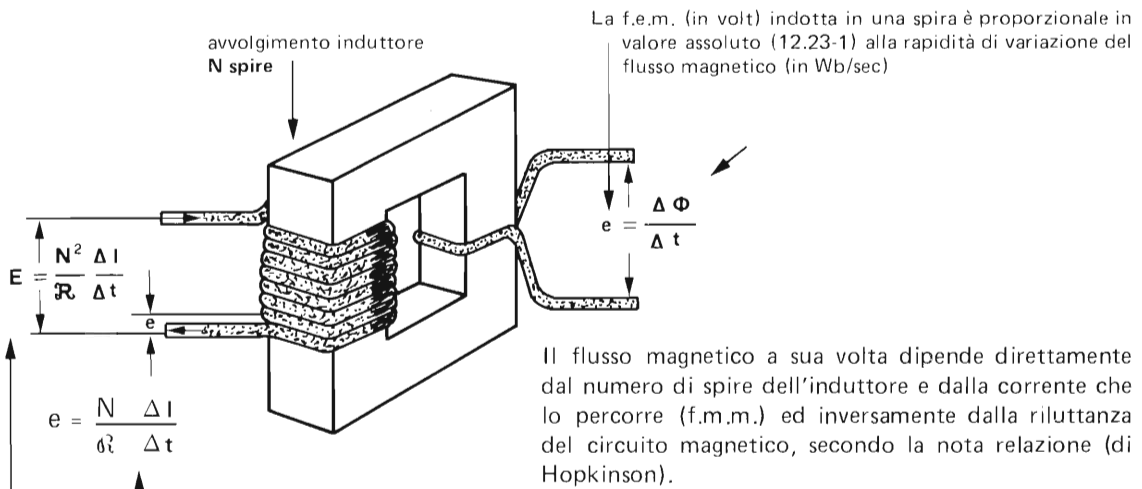
★

DEFINIZIONE DI INDUTTANZA O AUTOINDUZIONE

Si indaga in che misura la f.e.m. autoindotta al primario (induttore) dipende dalle caratteristiche fisiche del circuito elettromagnetico: numero di spire **N** e riluttanza $\mathcal{R}$.

Si contempla il caso di un circuito elettromagnetico costituito da un unico avvolgimento induttore che funge anche da indotto

Il flusso magnetico a sua volta dipende direttamente dal numero di spire dell'induttore e dalla corrente che lo percorre (f.m.m.) ed inversamente dalla riluttanza del circuito magnetico, secondo la nota relazione (di Hopkinson).

$$\Phi = \frac{NI}{\mathcal{R}}$$

flusso (in Wb) → Φ; NI ← f.m.m. (in Asp); $\mathcal{R}$ ← riluttanza (in Asp/Wb)

Ferme restando le caratteristiche fisiche dell'induttore:

numero di spire **N**
riluttanza magnetica $\mathcal{R}$

le variazioni di flusso dipenderanno unicamente dalle variazioni di corrente: cioè

$$\Delta\Phi = \frac{N \Delta I}{\mathcal{R}}$$

L'espressione iniziale della f.e.m. indotta in una spira diventa:

$$e = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = \frac{N}{\mathcal{R}} \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Questa espressione ovviamente **vale anche per ogni spira dell'avvolgimento induttore**, poichè abbraccia lo stesso flusso, perciò:

la f.e.m. autoindotta (in volt) ai capi dell'intero avvolgimento induttore sarà proporzionale al relativo numero di spire

$$E = Ne = N \frac{N}{\mathcal{R}} \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{N^2}{\mathcal{R}} \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Come si vede, il rapporto $\frac{N^2}{\mathcal{R}}$ dipende unicamente dalle caratteristiche fisiche dell'induttore.

Esso si chiama **coefficiente di autoinduzione** o **induttanza** e si scrive

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$$

induttanza (unità di misura: henry) → L; N^2 ← numero di spire (al quadrato) dell'avvolgimento; $\mathcal{R}$ ← riluttanza del circuito magnetico (in Asp/Wb)

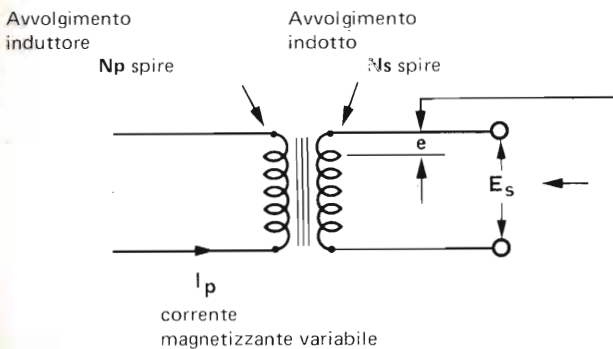
COEFFICIENTE DI MUTUA INDUZIONE

Si indaga in che misura la f.e.m. indotta al secondario (indotto) dipende dalle caratteristiche fisiche del circuito elettromagnetico: numero di spire primarie **Np**, numero di spire secondarie **Ns**, riluttanza $\mathcal{R}$.

Incominciamo intanto ad usare i simboli grafici e così facciamo più rapidamente i disegni.

Si contempla il reciproco funzionamento di un circuito elettromagnetico costituito da due avvolgimenti accoppiati: uno che funge da induttore, l'altro da indotto e viceversa.

A) Primario induttore, secondario indotto

Per lo stesso ragionamento fatto alla pagina precedente,

f.e.m. indotta in una spira a causa della corrente magnetizzante nel primario $e = \frac{Np}{\mathcal{R}} \frac{\Delta I}{\Delta t}$

f.e.m. indotta in tutto il secondario

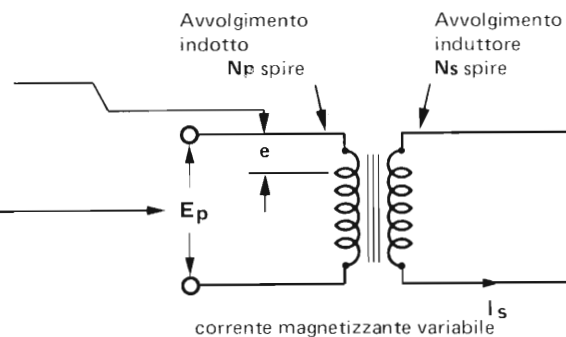
$$Es = Ns\, e = Ns \frac{Np}{\mathcal{R}} \frac{\Delta I}{\Delta t} = \frac{Np\, Ns}{\mathcal{R}} \frac{\Delta Ip}{\Delta t}$$

B) Primario indotto, secondario induttore

Per lo stesso ragionamento fatto alla pagina precedente,

f.e.m. indotta in una spira a causa della corrente magnetizzante nel secondario $e = \frac{Ns}{\mathcal{R}} \frac{\Delta Is}{\Delta t}$

f.e.m. indotta in tutto il primario

$$Ep = Np\, e = Np \frac{Ns}{\mathcal{R}} = \frac{Np\, Ns}{\mathcal{R}} \frac{\Delta Is}{\Delta t}$$

C) Conclusione

Il fenomeno è assolutamente reversibile: la f.e.m. che si ottiene ai capi di un avvolgimento, inserendo una corrente variabile nell'altro, è identica a quella che si otterrebbe nell'altro, inserendo la medesima corrente nel primo. Esse valgono

$$Es = \frac{Np\, Ns}{\mathcal{R}} \frac{\Delta Ip}{\Delta t} \qquad Ep = \frac{Np\, Ns}{\mathcal{R}} \frac{\Delta Is}{\Delta t}$$

Come si vede, la grandezza $\frac{Np\, Ns}{\mathcal{R}}$ dipende unicamente dalle caratteristiche fisiche.

Essa si chiama **coefficiente di mutua-induzione** e si scrive

coefficiente di mutua-induzione (unità di misura: henry) → $M = \frac{Np\, Ns}{\mathcal{R}}$ ← prodotto dei numeri di spire primarie e secondarie; riluttanza del circuito magnetico (Asp/Wb)

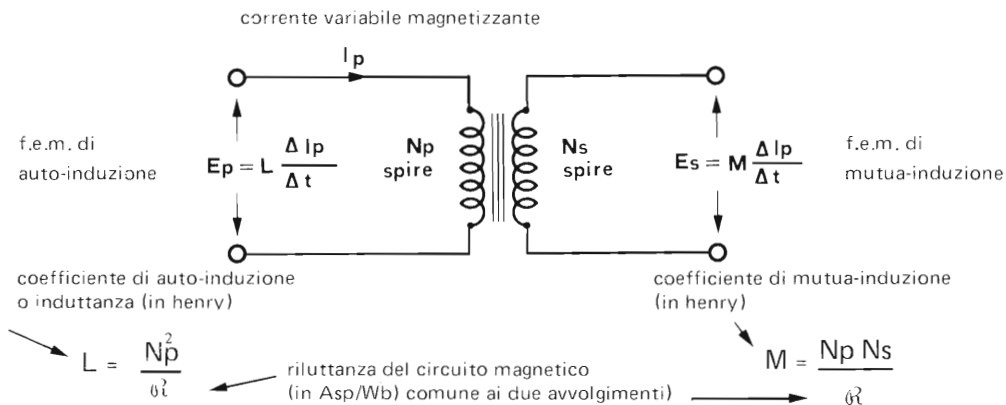
CONFRONTO FRA I COEFFICIENTI DI AUTO E MUTUA INDUZIONE

Si riprendono in considerazione comparativamente i fenomeni che avvengono nei circuiti elettromagnetici concatenati con due avvolgimenti (trasformatori).

Riassumiamo: il **coefficiente di mutua-induzione** riguarda la relazione fra la corrente variabile introdotta in un avvolgimento e la f.e.m. prodotta nell'altro; mentre

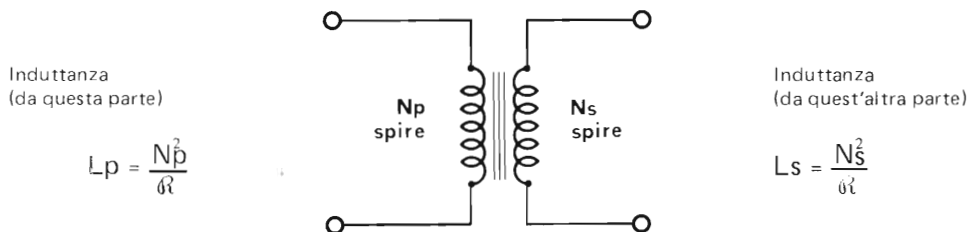
il **coefficiente di auto-induzione o induttanza** riguarda la relazione fra la corrente variabile introdotta in un avvolgimento e la f.e.m. prodotta nello stesso.

Nota: E' evidente che in un trasformatore in cui i due avvolgimenti hanno lo stesso numero di spire (rapporto spire = 1) i coefficienti di auto e mutua induzione si identificano (sono uguali).

A) In un circuito con due avvolgimenti, dove uno è percorso da corrente variabile e l'altro è aperto, avvengono i seguenti fenomeni

Memo

L'autoinduzione o induttanza la troviamo dalla parte dell'avvolgimento induttore (cioè quello percorso dalla corrente variabile magnetizzante).

La mutua induzione la troviamo dalla parte dello avvolgimento indotto (cioè l'altro, quello aperto).

B) Un trasformatore può fungere da induttanza, usando uno solo dei due avvolgimenti e mantenendo l'altro aperto

Per sapere in che rapporto stanno i due valori

basta fare il rapporto fra le induttanze $\frac{L_p}{L_s} = \frac{N_p^2}{N_s^2}$ e possiamo concludere che esse stanno fra loro come il quadrato del rapporto spire

INDUTTANZA RISULTANTE DA PIU' INDUTTORI IN SERIE

Si esamina come si distribuiscono le f.e.m. indotte e si calcola il valore complessivo dell'induttanza.

Il collegamento in serie

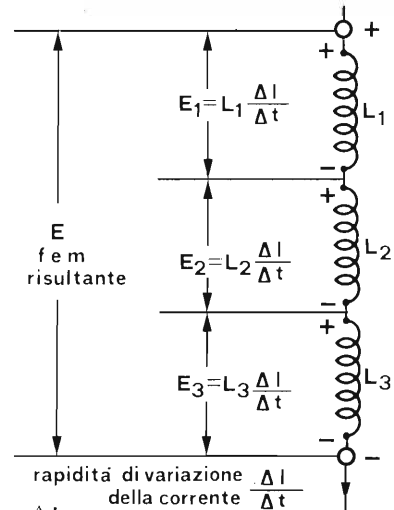
è quello qui illustrato: l'estremità di un induttore viene collegata con una del successivo in modo da formare una catena con le due estremità libere

A) **La f.e.m. risultante** $E = E_1 + E_2 + E_3$

è uguale alla somma delle f.e.m. dei singoli componenti.

B) **L'induttanza risultante**

è quella che si riscontra ai capi del circuito serie.

Per un dato valore $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ di rapidità di variazione della corrente, ai capi degli induttori e globalmente ai capi del circuito serie, si manifestano rispettivamente le seguenti f.e.m. indotte:

$$E_1 = L_1 \frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad E_2 = L_2 \frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad E_3 = L_3 \frac{\Delta I}{\Delta t} \qquad E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Cerchiamo ora di calcolare il valore della induttanza complessiva **L** in funzione delle induttanze dei singoli induttori componenti.

Si parte dal concetto che la f.e.m. complessiva è somma delle f.e.m. dei singoli induttori; cioè

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t} = E_1 + E_2 + E_3 = L_1 \frac{\Delta I}{\Delta t} + L_2 \frac{\Delta I}{\Delta t} + L_3 \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Semplificando le espressioni differenziali si ottiene e si conclude

L'induttanza risultante di più induttori in serie è uguale ...	$L = L_1 + L_2 + L_3$	... alla somma delle singole induttanze componenti

C) **Induttanza di induttori serie concatenati col medesimo circuito magnetico**

Significa mettere in serie gli avvolgimenti appartenenti ad uno stesso nucleo magnetico.
Per il calcolo si parte dalla ormai nota relazione della induttanza (vedi 12.27-2).

induttanza (in henry) → $L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$

- N^2 ← numero di spire dell'avvolgimento ← Nel nostro caso, come numero dispire, prenderemo la somma **algebrica** delle spire di ogni avvolgimento
- $\mathcal{R}$ ← riluttanza del circuito magnetico (in Asp/Wb)

cioè l'espressione si modificherà così

Induttanza (in henry) → $L = \frac{(N_1 + N_2 + N_3)^2}{\mathcal{R}}$

- $(N_1 + N_2 + N_3)^2$ ← **somma algebrica del numero di spire di ogni avvolgimento**
- $\mathcal{R}$ ← **riluttanza del circuito magnetico**

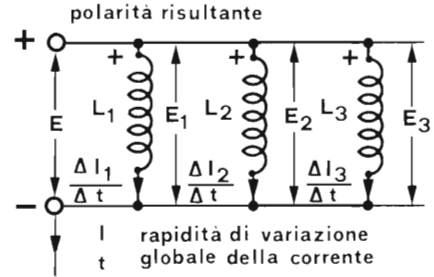
Avvertenza: A proposito della somma algebrica, bisogna star bene attenti alla polarità istantanea dei singoli avvolgimenti che, come è noto, può dipendere:

a) dall'inversione di collegamento dei terminali di un avvolgimento
b) dall'inversione del senso di rotazione di un avvolgimento rispetto agli altri.

INDUTTANZA RISULTANTE DA PIU' INDUTTORI IN PARALLELO

Si esamina come si distribuiscono le correnti induttrici e si calcola il valore complessivo dell'induttanza.

Il collegamento in parallelo

è quello illustrato qui: le estremità di una parte vengono collegate fra di loro e così quelle dall'altra parte.

A) **La f.e.m. risultante** $E = E_1 + E_2 + E_3$

è uguale alla f.e.m. indotta ai capi di ciascuno dei componenti.

Le f.e.m. singole devono essere uguali fra di loro per definizione di collegamento parallelo.

B) **L'induttanza risultante**

è quella che si riscontra ai capi del circuito parallelo.

Per un dato valore **E** di forza elettromotrice indotta, si ha una distribuzione di rapidità di variazione di corrente in ciascun induttore dipendente dal valore dell'induttanza secondo la solita legge di Lenz (valori singoli e valore globale).

$$E = L_1 \frac{\Delta I_1}{\Delta t} \quad E_2 = L_2 \frac{\Delta I_2}{\Delta t} \quad E_3 = L_3 \frac{\Delta I_3}{\Delta t} \quad E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

Cerchiamo ora di calcolare il valore della induttanza complessiva **L** in funzione dell'induttanza dei singoli induttori componenti.

Si parte dal concetto che le singole f.e.m. indotte e quella complessiva sono uguali e si risolvono le relazioni precedenti rispetto alle variazioni ΔI delle correnti tenendo presente che:

$$\Delta I = \Delta I_1 + \Delta I_2 + \Delta I_3 \qquad \text{parziali} \begin{cases} \Delta I_1 = E \dfrac{\Delta t}{L1} \\ \Delta I_2 = E \dfrac{\Delta t}{L2} \\ \Delta I_3 = E \dfrac{\Delta t}{L3} \end{cases}$$

totale $\quad \Delta I = E\,\Delta t \left(\frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3} \right)$

separando i termini $\quad \frac{\Delta I}{\Delta t} \frac{1}{E} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$

poichè $\quad L = E \frac{\Delta t}{\Delta I}$ è $\frac{\Delta I}{\Delta t} \frac{1}{E} = \frac{1}{L_1} + \frac{1}{L_2} + \frac{1}{L_3}$

facendo l'inverso si può concludere che

L'induttanza risultante di più induttori in parallelo è uguale...	$L = \dfrac{1}{\dfrac{1}{L_1} + \dfrac{1}{L_2} + \dfrac{1}{L_3}}$	... all'inverso della somma degli inversi delle singole induttanze.

C) **Induttanza di induttori parallelo concatenati col medesimo circuito magnetio**

Significa mettere in parallelo gli avvolgimenti appartenenti ad uno stesso nucleo magnetico.

La relazione è ancora questa stessa appena citata con l'avvertenza di tener conto del segno algebrico di ciascun termine in funzione delle eventuali inversioni di collegamento o di senso di rotazione del relativo avvolgimento.

Paragrafo 12.3

ELETTROMAGNETISMO IN CORRENTE ALTERNATA

Indice degli argomenti e delle pagine

CORRENTI INDOTTE

Si riprende l'argomento 12.25 e si cita un caso particolare.

Abbiamo visto che (ad avvolgimento induttore attraversato da corrente variabile) se si collega un carico all'avvolgimento indotto esso diviene sede di corrente che, nell'avvolgimento stesso, crea una f.m.m. opposta a quella creata dall'induttore.

Esaminando separatamente questo fenomeno da quello creato dall'induttore, diremo che l'indotto caricato crea una forza contro-elettromotrice sull'induttore che dipende, come al solito, dalle seguenti grandezze

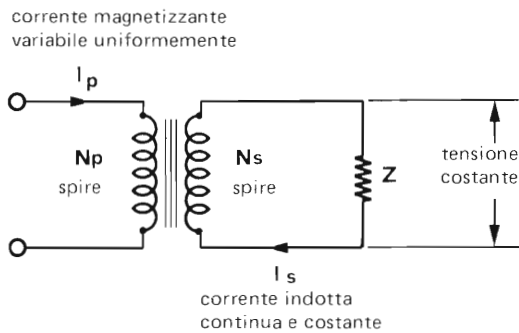
f.c.e.m. al primario (in volt) ⟶ $-E_1 = M \dfrac{\Delta I_s}{\Delta t}$ ⟵ rapidità di variazione della corrente indotta (Amp/sec)

M: coefficiente di mutua induzione

(in henry) ⟶ $M = \dfrac{N_p N_s}{\mathcal{R}}$

$N_p N_s$ ⟵ numero spire primarie e secondarie

$\mathcal{R}$ ⟵ riluttanza (in Asp/Wb)

A) F.c.e.m. in caso di corrente continua indotta

E' ormai noto che, per avere una corrente continua nel carico, è indispensabile avere una tensione costante ai capi dell'avvolgimento indotto **Ns**, e che per avere una tensione costante è sufficiente fare variare uniformemente la corrente magnetizzante nell'induttore.

La corrente continua che attraversa anche l'indotto, non crea alcuna f.c.e.m. sull'induttore, c'è da chiedersi da che parte provenga l'energia che inequivocabilmente alimenta il carico.

Nessun dubbio che essa provenga, sottoforma di corrente continua che si somma a quella variabile, dal generatore che alimenta l'induttore.

Infatti, la corrente smagnetizzante dell'indotto, provocherà una corrente continua nell'induttore che ripristinerà la magnetizzazione perduta nel circuito magnetico.

FORZE ELETTROMOTRICI INDOTTE

Si riprende l'argomento 12.25 e lo si adatta a particolari forme di variazioni di corrente.
Si esaminano i risultati per avere delle idee chiare sui fenomeni.

L'espressione, in valore assoluto, della **f.e.m.** auto-indotta in un circuito elettromagnetico

$$E = L \frac{\Delta I}{\Delta t}$$

dice che:

questa **forza elettromotrice** (in volt) **auto-indotta**, nel caso più generale, non è una costante, ma varia...

... e varia a seconda delle mutazioni di **rapidità di variazione della corrente** (rispetto al tempo) ed inoltre il valore della rapidità...

... deve essere moltiplicato per questo parametro fisso che si chiama **induttanza** e che dipende in questo modo dalle caratteristiche elettromagnetiche:

induttanza (in henry) ⟶ $L = \dfrac{N^2}{\mathcal{R}}$ ⟵ numero di spire (al quadrato) / ⟵ riluttanza (in Asp/Wb)

Abbiamo già visto che solo se la rapidità di variazione è la stessa in ogni istante (variazione uniforme), la f.e.m. auto-indotta **E** è costante e di valore proporzionale alla rapidità stessa (cioè, in gergo: mentre la corrente varia uniformemente, la tensione è continua); la polarità sarà relativamente negativa se la corrente cresce, positiva se la corrente decresce.

Ma se la rapidità di variazione della corrente non si mantiene costante, anche la tensione indotta varierà in funzione di questa rapidità.

Una corrente costante (in gergo: una corrente continua che non cambi di valore) invece non crea alcuna f.e.m. indotta (a causa del fatto che non si producono variazioni di corrente).

Quella piccola tensione che si dovesse riscontrare ai capi dell'avvolgimento è unicamente dovuta alla caduta di tensione della componente resistiva dell'avvolgimento stesso.

Attenzione - L'andamento della tensione indotta è generalmente diverso da quello della corrente: esso infatti (e lo ripeteremo fino alla noia) dipende non dai valori assoluti della corrente, ma unicamente dalla rapidità delle sue variazioni.

Meditiamo sui due casi particolari appena accennati:

A) corrente: crescente uniformemente; → tensione: costante
B) corrente: costante; → tensione: zero

Esempio - Una corrente da un miliardo di ampere ed una da pochi milliampere, se non variano, non creano alcuna f.e.m. ai capi di un induttore;
se entrambe variano allo stesso modo, creano la stessa f.e.m. indotta nello stesso induttore.

Infine, se la più piccola varia più rapidamente della grande, creerà una f.e.m. maggiore dell'altra.

IL TRASFORMATORE E LE F.E.M. ALTERNATE IN ESSO PRESENTI

Si riprendono gli argomenti trattati in 12.28-1 e si adattano gli stessi concetti a correnti variabili sinoidalmente.

A) Primario induttore, secondario indotto

La corrente $\underset{\sim}{Ip}$ che attraversa il primario di un trasformatore, varia in questo modo:

Nota: Il fenomeno è reversibile: la stessa corrente inserita nel secondario genera al primario la stessa f.e.m. (vedi caso B).

B) Primario indotto, secondario induttore

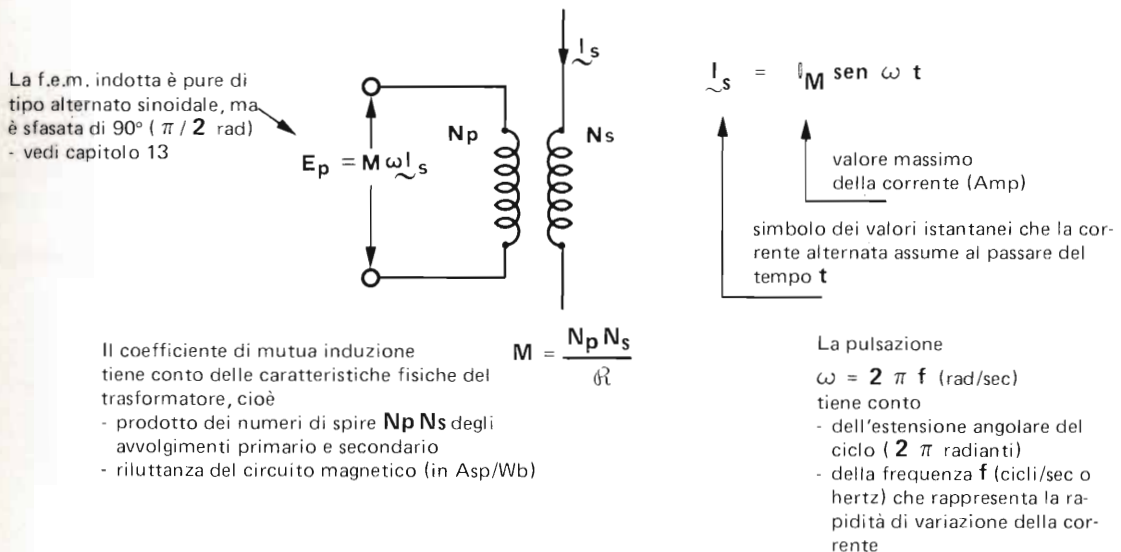
La corrente Is che attraversa il secondario di un trasformatore, varia in questo modo:

Il coefficiente di mutua induzione tiene conto delle caratteristiche fisiche del trasformatore, cioè
- prodotto dei numeri di spire Np Ns degli avvolgimenti primario e secondario
- riluttanza del circuito magnetico (in Asp/Wb)

$$M = \frac{N_p N_s}{\mathcal{R}}$$

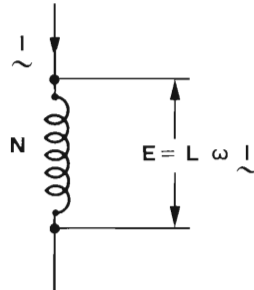
La pulsazione

$\omega = 2 \pi f$ (rad/sec)

tiene conto
- dell'estensione angolare del ciclo (2 π radianti)
- della frequenza f (cicli/sec o hertz) che rappresenta la rapidità di variazione della corrente

Nota: Il fenomeno è reversibile: la stessa corrente inserita nel primario genera nel secondario la stessa f.e.m. (vedi caso A).

L'INDUTTORE E LA F.E.M. ALTERNATA IN ESSO PRESENTE

Si riprendono gli argomenti in 12.25-4 e si adattano gli stessi concetti a correnti variabili sinoidalmente.

La corrente $\underset{\sim}{I}$ che attraversa l'avvolgimento di un induttore, varia in questo modo:

La f.e.m. indotta è pure di tipo alternato sinoidale, ma è sfasata di 90° ($\pi/2$ rad)

- vedi capitolo 13

Il coefficiente di auto-induzione (induttanza) tiene conto delle caratteristiche fisiche dell'induttore, cioè

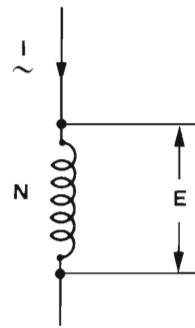
- numero di spire **N** (al quadrato) dell'avvolgimento
- riluttanza del circuito magnetico (in Asp/Wb)

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}}$$

La pulsazione

$\omega = 2\pi f$ (rad/sec) tiene conto

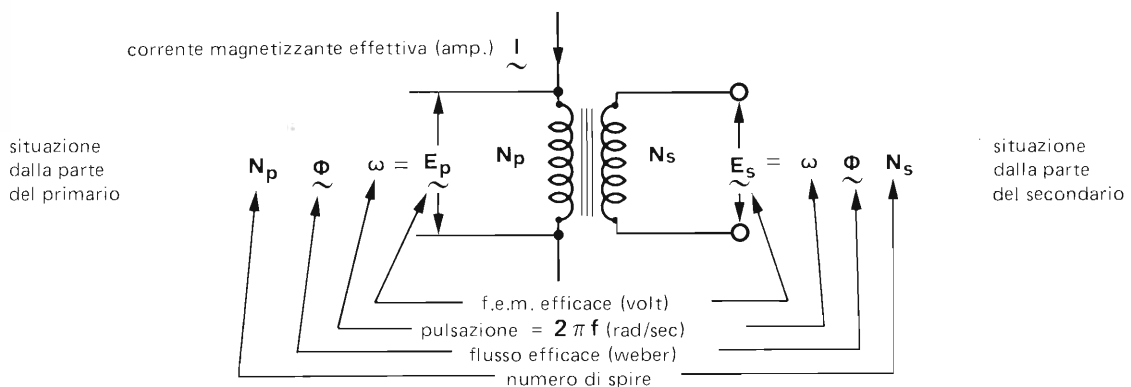
- dell'estensione angolare del ciclo (2π radianti)
- della frequenza **f** (cicli/sec o hertz) che rappresenta la rapidità di variazione della corrente

Illustriamo ora il "meccanismo" elettromagnetico in corrente alternata che sovrintende alla formazione di f.e.m. auto-indotta, pure alternata.

Questa f.e.m. è creata dal flusso alternato presente nel circuito magnetico dell'induttore.

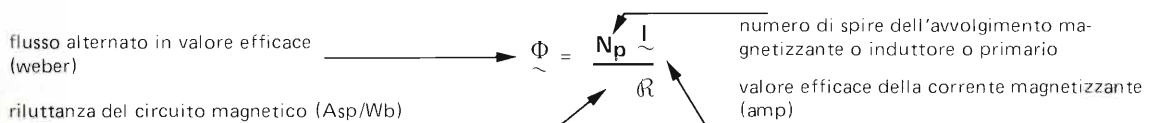
RAPPORTO DI TRASFORMAZIONE DI TENSIONE DI UN TRASFORMATORE

E' logico che anche in corrente alternata si debbano raggiungere le stesse conclusioni tratte in 12.23-5: le f.e.m. ai capi di due avvolgimenti concatenati con lo stesso flusso, stanno fra loro come il corrispondente rapporto spire.

Diremo più generalmente che qualsiasi avvolgimento-concatenato con un flusso alternato, è sede di una f.e.m. indotta proporzionale al numero di spire dell'avvolgimento stesso.

Nel caso che andiamo ad esaminare, uno degli avvolgimenti è quello che genera il flusso alternato e si chiama avvolgimento magnetizzante o primario.

Ripetiamo che entrambi gli avvolgimenti sono concatenati al medesimo.

$$\underset{\sim}{\Phi} = \frac{N_p \underset{\sim}{I}}{\mathcal{R}}$$

- flusso alternato in valore efficace (weber) → $\underset{\sim}{\Phi}$
- numero di spire dell'avvolgimento magnetizzante o induttore o primario → N_p
- valore efficace della corrente magnetizzante (amp) → $\underset{\sim}{I}$
- riluttanza del circuito magnetico (Asp/Wb) → $\mathcal{R}$

Torniamo alle forze elettromotrici primaria e secondaria e facciamone il rapporto con le espressioni sopra riportate e semplifichiamo:

$$\frac{\underset{\sim}{E}_p}{\underset{\sim}{E}_s} = \frac{N_p \underset{\sim}{\Phi}\, \omega}{N_s \underset{\sim}{\Phi}\, \omega} = \frac{N_p}{N_s}$$

Da questa espressione possiamo concludere che le f.e.m. indotte stanno fra loro come il corrispondente rapporto spire.

Il rapporto si dirà in salita quando le spire dell'avvolgimento indotto (secondario) sono maggiori di quello induttore (primario); viceversa si dirà in discesa.

Valore della corrente magnetizzante

Il primario si presenta ai capi del generatore con la sua (12.28-2)

induttanza (henry) $\quad L = \dfrac{N_p^2}{\mathcal{R}}$

che, a causa delle variazioni alternate, si trasforma in (vedi capitolo 13)...

reattanza induttiva (ohm) $\quad X_L = \omega L$

Per la legge di Ohm la corrente magnetizzante (amp)

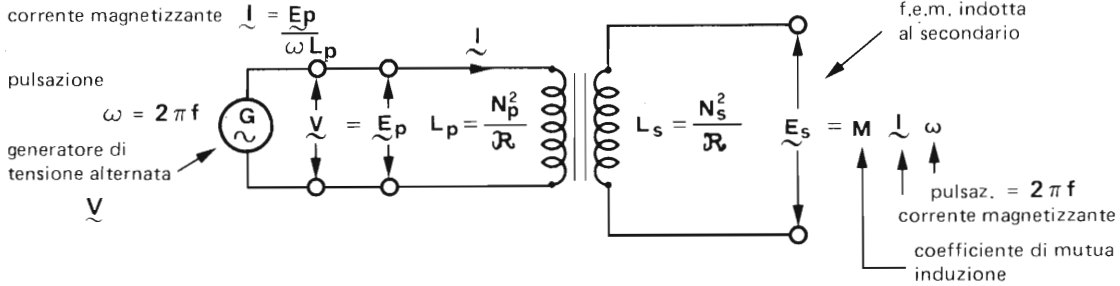
$$\underset{\sim}{I} = \frac{\underset{\sim}{V}}{X_L}$$

- tensione efficace del generatore (volt) → $\underset{\sim}{V}$
- reattanza dell'induttore (ohm) - vedi capitolo 13 → X_L

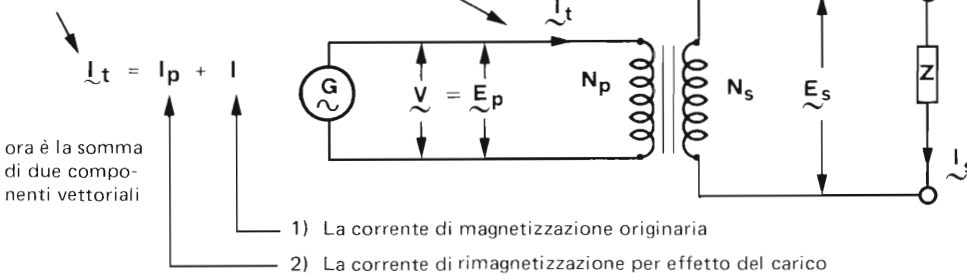
EFFETTI PRODOTTI DALLA CORRENTE SECONDARIA

Esaminiamo in che modo si richiama energia dal generatore attraverso il primario per far fronte ad un criterio applicato.

Secondario aperto

Riassumiamo quanto abbiamo visto alla pagina precedente.

Secondario che alimenta un carico

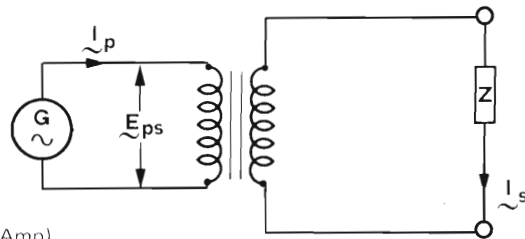
Per semplificare il problema, il carico collegato ai capi del secondario deve avere un valore **Z** (ohm) molto alto rispetto ai valori propri di induttanza e di resistenza del trasformatore (impedenza: vedi capitolo 13) in modo che la corrente sia trascurabilmente poco influenzata da questi.

La smagnetizzazione, così provocata nel circuito magnetico, obbliga il richiamo di ulteriore corrente dal generatore per ripristinare la magnetizzazione perduta.

Attenzione : Questa somma di correnti si deve intendere vettoriale.

RAPPORTO DI TRASFORMAZIONE DI CORRENTE DI UN TRASFORMATORE

Dimostreremo che la corrente è maggiore nell'avvolgimento a minor numero di spire e viceversa.

La corrente alternata, necessaria ad alimentare il carico collegato all'avvolgimento secondario, produce (vedi 12.33-2) un flusso magnetico alternato di direzione opposta a quello magnetizzante pure alternato.

Consideriamo per semplicità di ragionamento i soli effetti prodotti dal flusso smagnetizzante creato dal secondario chiuso su un carico.

Supponiamo, come è vero, che l'impedenza propria del generatore sia trascurabile. La corrente che si genera nel circuito primario chiuso sul generatore è data (legge di Ohm)

$$\tilde{I}_p = \frac{\tilde{E}_{ps}}{\omega L_p}$$

- $\tilde{E}_{ps}$: forza contro-elettromotrice primaria efficace (volt)
- diviso
- ωL_p: reattanza del primario (ohm) - vedi cap. 13
- L_p: induttanza (henry) del primario
- ω: pulsazione $2\pi f$ ← f = frequenza (in c/s o hertz)

Sviluppiamo questa espressione con quanto già conosciamo (vedi. 12.27-2 e 12.28-1)

$$M = \frac{N_p N_s}{\mathcal{R}} \qquad L_p = \frac{N_p^2}{\mathcal{R}}$$

$$\tilde{I}_p = \frac{\tilde{E}_{ps}}{\omega L_p} = \frac{M \tilde{I}_s \omega}{\omega L_p} = \frac{\frac{N_p N_s}{\mathcal{R}} \tilde{I}_s}{\frac{N_p^2}{\mathcal{R}}} = \frac{N_s \tilde{I}_s}{N_p}$$

ordiniamo in modo omogeneo i due membri dell'espressione

$$\frac{\tilde{I}_p}{\tilde{I}_s} = \frac{N_s}{N_p}$$

e concludiamo che
le correnti (alternate) primaria e secondaria stanno fra loro come l'inverso del rapporto spire dei relativi avvolgimenti.

Raccomandazione

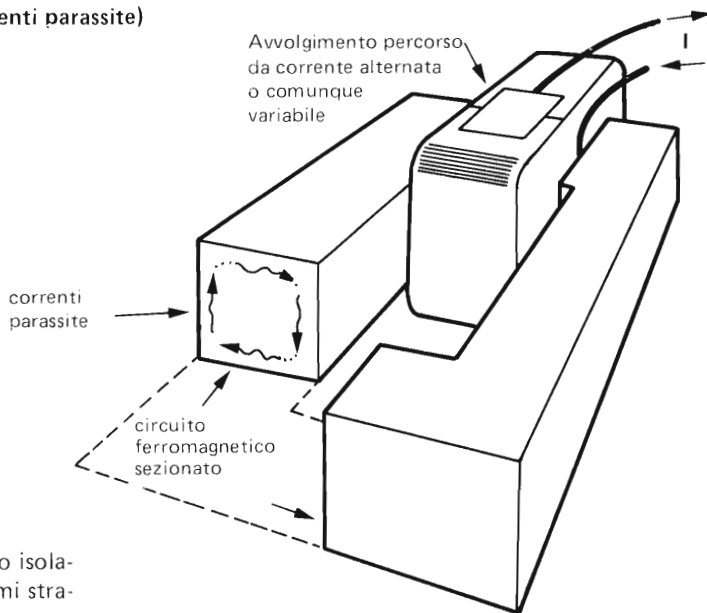
La magnetizzazione di un trasformatore con tensione continua crea valori molto alti di corrente magnetizzante, poichè viene a mancare la f.e.m. autoindotta (non producendosi variazioni di corrente). Essendo basso il valore della resistenza propria dell'avvolgimento, la corrente raggiunge valori tali da distruggerlo o da distruggere il generatore, se questi non è opportunamente protetto dai corti circuiti.

CORRENTI PARASSITE

L'induzione elettromagnetica si verifica anche in qualsiasi materiale conduttore che sia attraversato dal flusso alternato, come il ferro del circuito magnetico. Inconvenienti e rimedi.

Correnti indotte nel nucleo di ferro (correnti parassite)

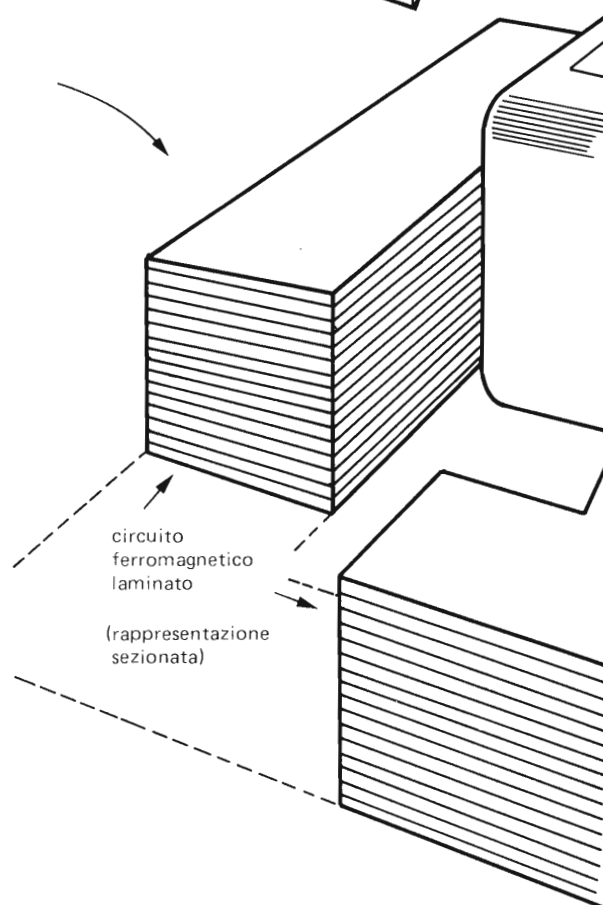
Anche il nucleo di ferro, in quanto è materiale conduttore, è sede di f.e.m. indotte che generano correnti elettriche che circolano ad anello chiuso attraverso la massa conduttrice del materiale stesso.

Queste correnti richiamano energia dal generatore attraverso l'avvolgimento primario, ma non svolgono altro ruolo che scaldare inutilmente e dannosamente il nucleo ferroso.

Rimedi

A) Laminare il nucleo

Il nucleo è costituito di lamine di ferro isolate fra loro con vernice o con sottilissimi strati di carta incollata.

In questo modo le correnti parassite diminuiscono notevolmente per due motivi:

1) Le f.e.m. vengono frazionate nel numero di lamine che compongono il nucleo
2) La resistenza elettrica di ogni nucleo elementare, composto da ogni lamina, è notevolmente più alta.

B) Polverizzare il nucleo

Per circuiti magnetici destinati a sopportare alte frequenze di variazione di flusso magnetico, il nucleo è composto da polvere di ferro impastata con materiale isolante termoindurente, cotto al forno.

C) Uso di sostanze minerali

Per altissime frequenze si usa la ferrite che è un materiale ceramico contenente ossido di ferro (e quindi con buona permeabilità magnetica) e contemporaneamente buon isolante elettrico.

D) Entità delle perdite con i materiali citati

Ridotte ai valori inferiori all'1%.

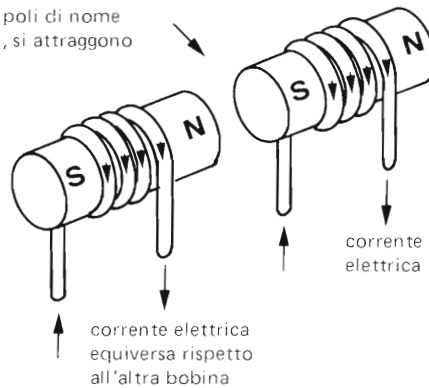
Paragrafo 12.4

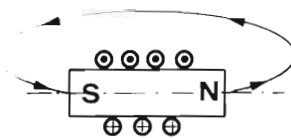
AZIONI ELETTRODINAMICHE

Indice degli argomenti e delle pagine

I MAGNETI SI ATTIRANO SECONDO I POLI OPPOSTI

Un campo magnetico ne attira o respinge un altro con l'unico scopo di massimizzare il proprio flusso. Sotto questo aspetto esamineremo le azioni di attrazione.

Ciò avviene perchè insieme formano un magnete il cui flusso è maggiore di quello che compete a ciascuno

Il fenomeno si verifica per corrente magnetizzante continua, ma anche per corrente alternata, purchè entrambe abbiano stessa frequenza e fase

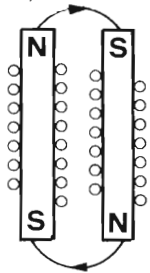
Infatti, esaminiamo un percorso analogo per ciascun magnete, fra i tanti percorsi che costituiscono il mantello di flusso magnetico.

Qui è evidente che il percorso analogo di una linea di flusso, per i due magneti uniti coi poli di nome opposto, è inferiore alla somma dei singoli percorsi.

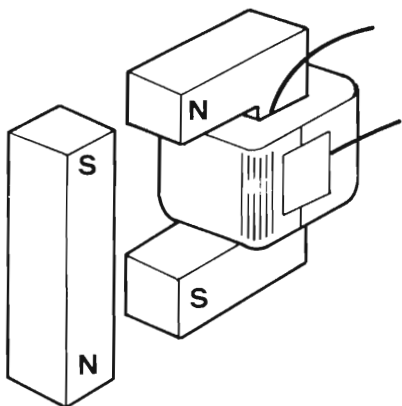
Conclusione

Minor percorso significa minore riluttanza magnetica e minore riluttanza significa maggior flusso, secondo la legge di Hopkinson o legge di Ohm magnetica (vedi 12.14-1).

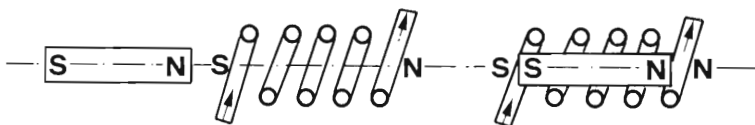
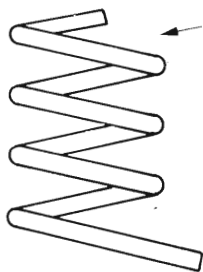
Questo flusso aumenta dopo la congiunzione in quanto alla somma delle f.m.m. corrisponde una riluttanza inferiore alla somma delle singole riluttanze.

ALTRI ESEMPI DI ATTRAZIONE MAGNETICA

Qualsiasi altro esempio di attrazione, come anche la repulsione, mostra che il fenomeno persegue sempre lo stesso scopo: massimizzare il flusso magnetico.

Due barrette magnetiche avvicinate dalla parte dei poli di nome opposto, si attirano per ridurre al minimo il percorso delle linee di flusso.

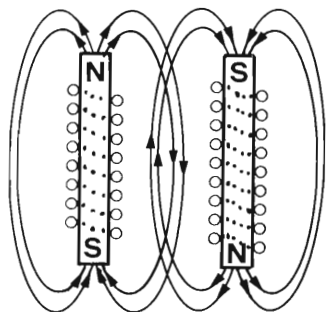
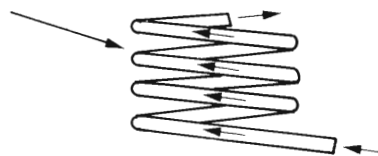
In questo modo, riducendo al minimo la riluttanza, si rende massimo il flusso magnetico.

La presenza di ferro anche non magnetizzato, crea forze di attrazione, perchè il ferro ha una riluttanza minore di un uguale spazio di aria.

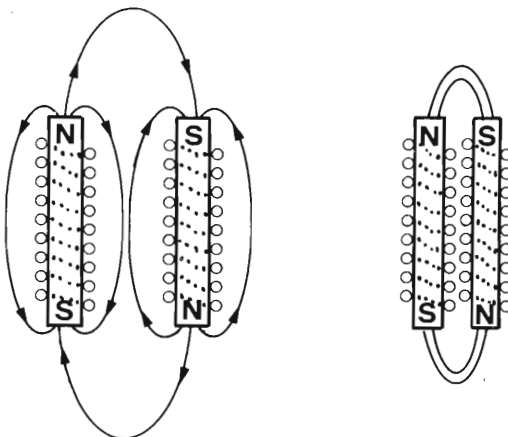
L'attrazione avviene poi anche perchè, non bastando il maggiore flusso creato dalla presenza del materiale a maggiore permeabilità (il ferro), il flusso si può incrementare ancora riducendo la parte in aria del circuito, finchè il pezzetto di ferro non sia completamente a contatto con il nucleo magnetico.

I poli opposti vi si formano spontaneamente.

Una barretta di ferro il cui asse coincide con quello di un solenoide attraversato da corrente, viene attirato fino al centro.

Le spire distanziate di un solenoide non attraversato da corrente ...

... tendono ad avvicinarsi quando sono attraversate da corrente.

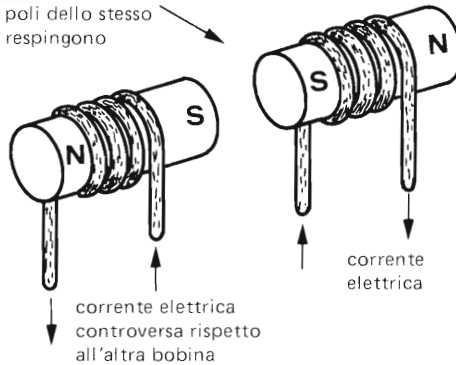
Il motivo è sempre lo stesso.

Avvicinandosi si abbrevia il percorso delle linee di flusso, diminuisce la riluttanza e aumenta il flusso.

Importante conclusione

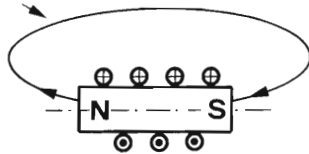
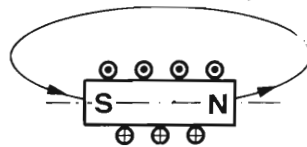
Linee di flusso parallele e controverse creano attrazione

I MAGNETI SI RESPINGONO SECONDO I POLI OMONIMI

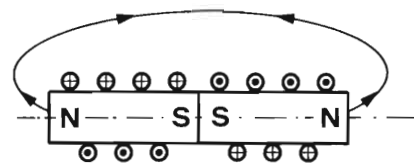
Un campo magnetico ne attira o respinge un altro con l'unico scopo di massimizzare il proprio flusso. Sotto questo aspetto esaminiamo le azioni di repulsione.

Due circuiti magnetici, i cui poli dello stesso nome si trovino affacciati si respingono

Ciò avviene perchè insieme formano un magnete il cui flusso è minore di quello che si avrebbe se affacciati si trovassero i poli di nome opposto (vedi 12.41-1)

Il fenomeno si verifica per corrente magnetizzante continua, ma anche per corrente alternata, purchè entrambe abbiano stessa frequenza e fase.

Infatti, esaminiamo un percorso analogo per ciascun magnete, fra i tanti percorsi che costituiscono il mantello di flusso magnetico.

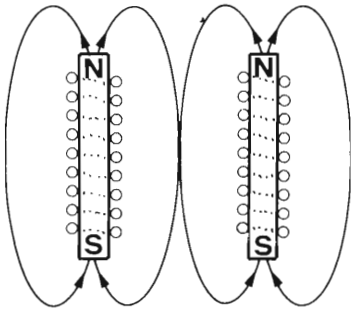
percorso esterno di una linea di flusso per questo magnete

percorso analogo di una linea di flusso per quest'altro magnete

Anche se il percorso analogo per i due magneti uniti coi poli dello stesso nome è inferiore alla somma dei singoli percorsi, le singole f.m.m. ed i rispettivi flussi sono opposti.

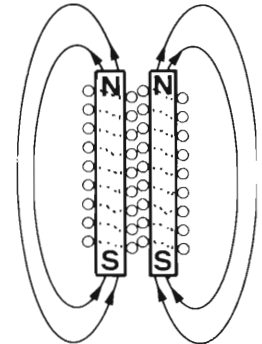
La f.m.m. risultante ed il relativo flusso corrisponde alla differenza dei singoli valori.

Conclusione

Minore f.m.m. significa minore flusso secondo la legge di Hopkinson o legge di Ohm magnetica (vedi 12.14-1).

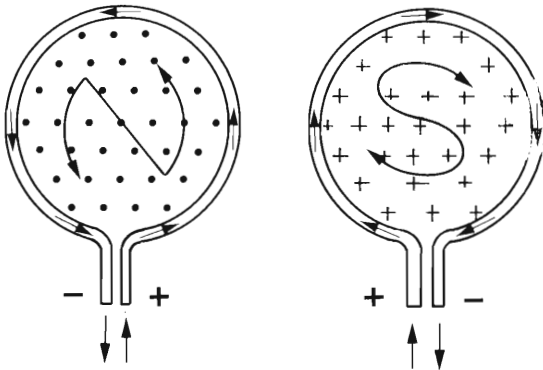
Questo flusso diminuisce dopo la congiunzione in quanto la f.m.m. diminuisce di più di quanto diminuisce la riluttanza.

ALTRI ESEMPI DI REPULSIONE MAGNETICA

Qualsiasi altro esempio di repulsione, come anche l'attrazione, mostra che il fenomeno persegue sempre lo stesso scopo: massimizzare il flusso magnetico.

Due barrette magnetiche, avvicinate dalla parte dei poli dello stesso nome, si respingono perchè la loro vicinanza crea un addensamento delle linee di flusso nello spazio compreso fra le barrette stesse.

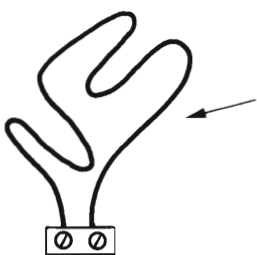
Altre linee uscenti da un polo non possono entrare nel polo dell'altra da dove escono altre linee e perciò devono cercarsi un altro percorso per chiudersi sul polo opposto.

Essendo un altro percorso generalmente più lungo, ne deriva un aumento di riluttanza e diminuzione di flusso.

Di qui perciò la preferenza, respingendosi, a starsene per conto loro con un flusso maggiore.

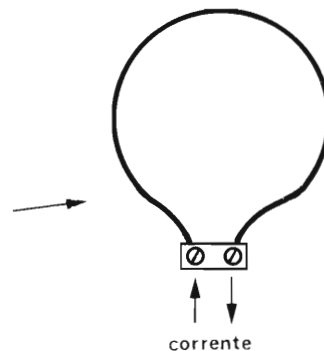
Le spire percorse da corrente tendono a dilatarsi.

Ogni spira di un solenoide attraversata da corrente come nelle figure, è sollecitata da un'azione che tende a dilatarla, perchè, dilatandosi, aumenta la sezione di spazio abbracciata dal flusso e perciò diminuisce la riluttanza magnetica.

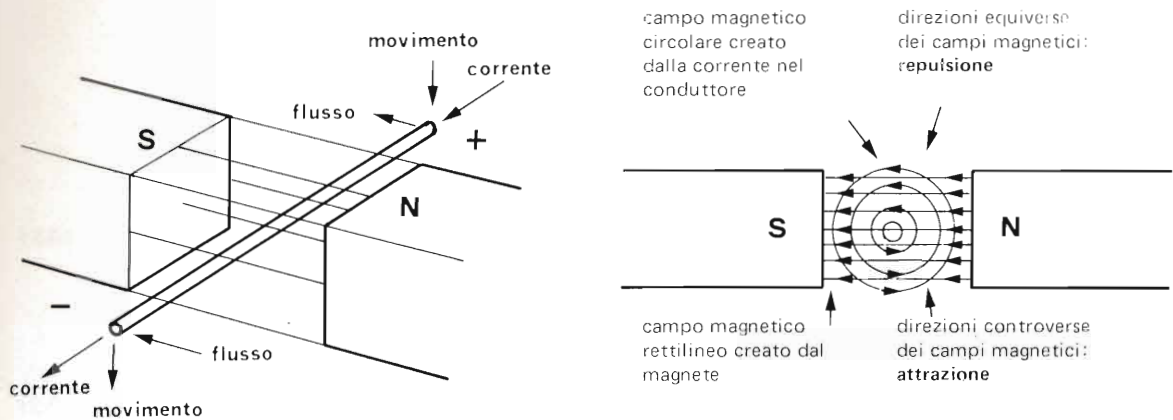
Approfittiamo delle figure per illustrare un'altra regola mnemonica che mostra da che parte sta un polo magnetico in funzione del senso circolatorio della corrente.

Importante conclusione: **linee di flusso parallele ed equiverse si respingono.**

Esperimento

Si prenda un conduttore molto sottile, affinchè sia molto flessibile, e lo si disponga in modo da abbracciare uno spazio molto ridotto.

Quando lo si fa attraversare da corrente esso si disporrà ben teso in cerchio.

Infatti abbracciando la maggior superficie che la sua lunghezza gli possa consentire, esso ha massimizzato il flusso magnetico, riducendo al minimo la riluttanza del circuito magnetico stesso.

AZIONI COMBINATE SU UN CONDUTTORE ATTRAVERSATO DA CORRENTE QUANDO E' IMMERSO IN UN CAMPO MAGNETICO

Un conduttore attraversato da corrente genera un campo magnetico che a sua volta crea azioni di attrazione e repulsione se è immerso in un altro campo magnetico.

Conclusione - Il conduttore, attratto verso il basso e respinto dall'alto, è costretto a muoversi verso il basso.

Osservazione

Se, anzichè corrente continua, si introducesse corrente alternata, il conduttore sarebbe sollecitato ad un movimento oscillante verso l'alto e verso il basso.

Regola mnemonica della mano sinistra per la **determinazione del movimento del conduttore** (ricordare: mano "**mancina**" iniziale **M** come motore)

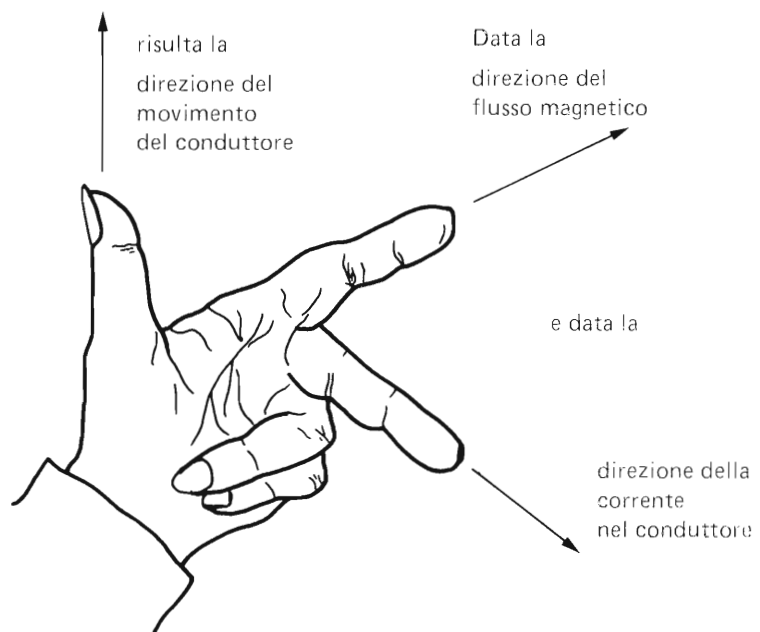
Le direzioni delle tre seguenti grandezze

1) flusso magnetico
2) direzione della corrente
3) movimento del conduttore

sono perpendicolari fra loro.

Le dita della mano sinistra siano disposte secondo tre direzioni perpendicolari fra loro.

Ogni dito indicherà la direzione di una grandezza, come segue:

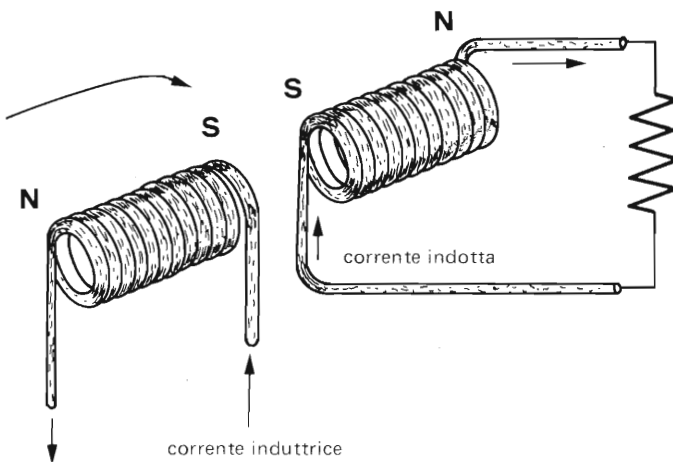
pollice = **movimento**
indice = **flusso**
medio = **corrente**

AZIONI PRODOTTE DA CORRENTI INDOTTE

Anche le correnti smagnetizzanti indotte nel secondario di un trasformatore creano azioni di repulsione fra gli avvolgimenti.

In un istante la situazione è quella segnata in figura.

Poli dello stesso nome si trovano affacciati.

Azione: **repulsione**.

Invertendosi la direzione della corrente induttrice, si inverte anche la direzione della corrente indotta e perciò entrambe le coppie di poli si invertono mantenendo l'azione repulsiva.

Esperimento

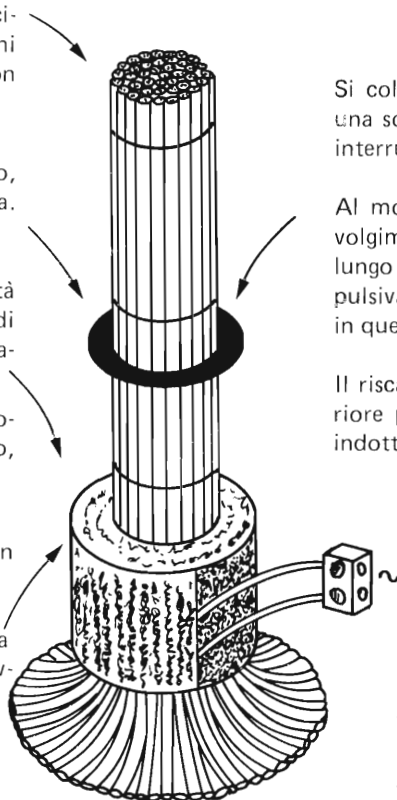
Si formi una colonna con qualche decina di fili di ferro plastificato, lunghi circa 50 cm., legandoli ben stretti con uno spago.

Si prenda un anello metallico chiuso, che abbracci comodamente la colonna.

Attorno alla colonna, in prossimità della base, si formi un avvolgimento di qualche centinaio di spire di filo di rame isolato.

Si stringa bene l'avvolgimento alla colonna, mediante piccoli cunei di legno, stuzzicadenti, ecc.

Si apra il fascio di fili della colonna, in modo da formare una solida base.

Si infili l'anello metallico attorno alla colonna e lo si lasci appoggiare all'avvolgimento.

Si colleghino i capi dell'avvolgimento ad una sorgente di corrente alternata con un interruttore.

Al momento in cui si dà corrente all'avvolgimento l'anello metallico si solleverà lungo la colonna stessa finchè l'azione repulsiva non farà equilibrio al suo peso ed in questo modo resterà sospeso.

Il riscaldamento dell'anello sarà una ulteriore prova della generazione di corrente indotta.

Si raccomanda di iniziare l'esperimento con tensioni modeste a scanso di spiacevoli sorprese.

La tensione può successivamente essere aumentata per rendere più appariscente il fenomeno.

Paragrafo 12.5

MAGNETOSTATICA

Indice degli argomenti e delle pagine

DESCRIZIONE DEI MAGNETI PERMANENTI E DEI FENOMENI CHE LI RIGUARDANO

Ci sono dei materiali che sono in grado di mantenere un flusso magnetico anche quando viene a cessare l'azione della forza magnetomotrice che lo ha creato.

Questi materiali, che contengono prevalentemente ferro, si chiamano **magneti permanenti**.

Ci sono anche materiali, cosiddetti **magneti naturali**, che si trovano in natura già allo stato magnetizzato.

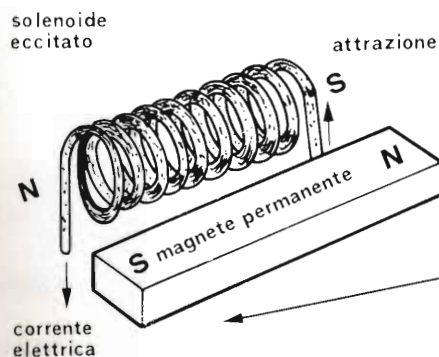
E' comunque impensabile che non ci sia stata, all'origine dei tempi, una forza magnetomotrice che li abbia creati e che poi sia venuta a mancare lasciando allo stato magnetizzato quei materiali che erano adatti a subire il fenomeno della magnetizzazione permanente.

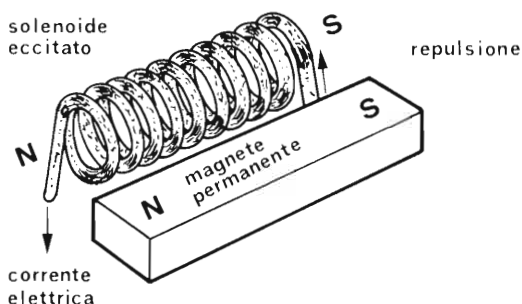
Magnetizzazione permanente significa dunque mantenimento del flusso anche quando viene a mancare la forza magnetomotrice.

L'intero nostro pianeta è un esempio in grande di magnete permanente naturale: evidentemente tiene dentro di sè enormi quantità di materiale soggetto a magnetismo permanente.

Polarità

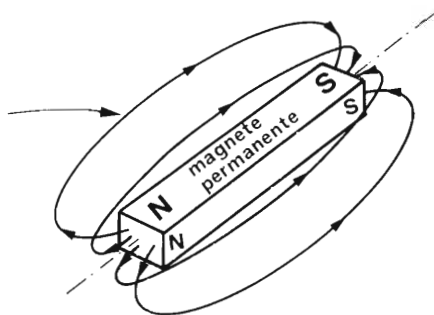
Il magnete permanente ha le stesse proprietà magnetiche tipiche dei solenoidi percorsi da corrente e perciò possiede anche una polarità magnetica.

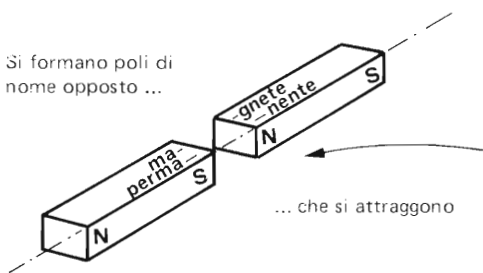
Chiameremo polo **Nord** di una barretta magnetizzata permanentemente quell'estremità che si lascia attirare dalla estremità sud di un solenoide eccitato (già percorso da corrente).

Ovviamente l'altra estremità si chiamerà polo **Sud** e sarà attirata dall'estremità nord del solenoide eccitato.

Lo stesso magnete permanente orientato in modo che le proprie estremità si trovino di fronte a quelle dello stesso nome di un solenoide eccitato, viene respinto.

PROPRIETA' DEI MAGNETI PERMANENTI

Il flusso magnetico si chiude sempre

Anche il flusso generato da un magnete permanente non può restare aperto perchè anche l'aria e il vuoto sono permeabili al magnetismo.

In un magnete permanente a forma di barretta, il campo magnetico si chiude verso l'esterno avvolgendo la barretta come un mantello.

Si formano poli di nome opposto ...

... che si attraggono

Taglio trasversale

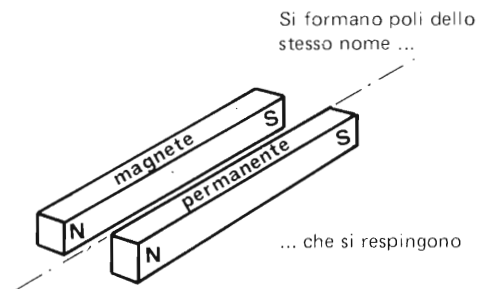
Spezziamo in due la barretta trasversalmente all'asse magnetico.

In corrispondenza del taglio si formano due poli di nome opposto fra di loro e opposto a quello della rispettiva estremità.

Questi poli ovviamente si attirano.

Taglio longitudinale

Se la barretta viene tagliata longitudinalmente, cioè lungo l'asse magnetico, su ciascun pezzo si formano poli dello stesso nome.

Questi poli ovviamente si respingono.

Magnete elementare: dipolo

Comunque si proceda nel tagliare il magnete permanente in pezzi sempre più minuti, si arriverà ad isolare una entità elementare provvista di **entrambi i poli**.

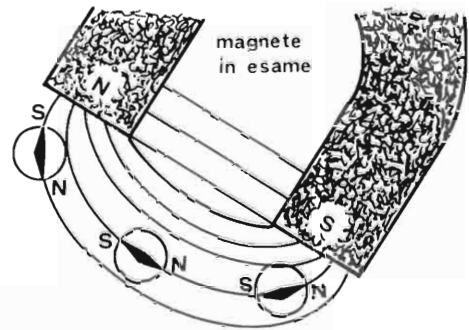
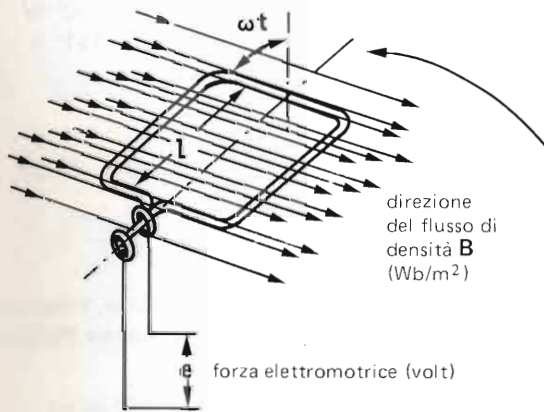
Ogni entità magnetica elementare si chiama **dipolo** e, se isolata, avrà il proprio circuito magnetico chiuso su di sè.

E' impossibile perciò isolare un polo solo perchè è impensabile un circuito magnetico **aperto**.

METODI PER RILEVARE LA PRESENZA DI CAMPI MAGNETICI PERMANENTI

Direzione del flusso (ago magnetico)

Abbiamo già visto (12.11-2) come, con un piccolo magnete permanente a forma di ago, sospeso nel suo baricentro e in grado di ruotare, si possano determinare non solo le linee del flusso, ma anche la polarità del magnete in esame.

Infatti, la punta Nord dell'ago si orienterà secondo la linea di flusso diretta verso il polo Sud del magnete in esame.

Generazione di f.e.m. e densità del flusso (spira rotante)

Abbiamo già visto (12.23-3) che una spira rotante, immersa in un campo magnetico, è sede ai suoi capi di una forza elettromotrice.

Posto l'asse di rotazione della spira in posizione perpendicolare alla direzione del flusso, la f.e.m. non dipenderà dalla posizione angolare dell'asse, ma solo dalla posizione angolare ωt (radianti) del piano della spira, variabile col tempo.

L'espressione della f.e.m. in funzione del tempo è la seguente:

$$e = B\, l\, v\, \operatorname{sen} \omega t$$

- e — f.e.m. istantanea (in volt)
- B — densità di flusso o induzione magnetica (in Wb/m^2)
- l — lunghezza della parte attiva della spira (in m.)
- v — velocità periferica della parte attiva della spira (m/sec.)
- ω — velocità angolare o pulsazione della rotazione della spira (in rad/sec.)
- t — tempo che passa (in sec.)

Essa è definita dalla seguente relazione:

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

- B — densità di flusso (Wb/m^2)
- Φ — flusso (Wb)
- A — superficie attraversata da detto flusso (m^2) (praticamente corrisponde alla superficie della spira)

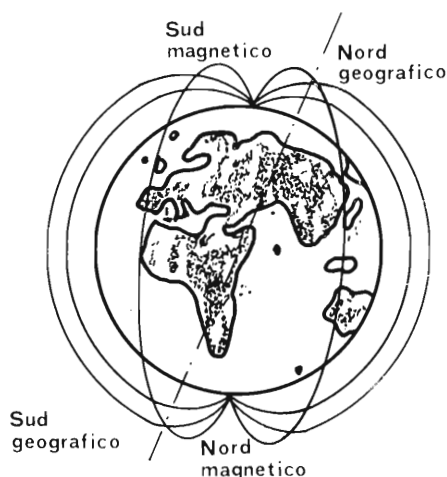
CAMPO MAGNETICO TERRESTRE

Proprietà magnetiche della Terra

Localizzazione dei poli e direzione del campo

La Terra, in virtù della sua composizione interna, è un magnete permanente i cui poli magnetici non coincidono con i poli geografici.

Inoltre, fin dall'invenzione della bussola, si è commessa un'inesattezza.

Infatti, poichè sono i poli magnetici di nome opposto che si attirano, l'aver chiamato Nord la punta dell'ago magnetico che indicava il Nord geografico, si è finito per localizzare a Nord il polo Sud magnetico e viceversa. Non fa niente, basta saperlo!

Posizione dei poli magnetici, rispetto alla posizione dei poli geografici

A parte l'inversione appena accennata, la posizione dei poli magnetici non coincide con la posizione dei poli geografici ed inoltre essa varia con il tempo in modo imprevedibile.

Nell'anno 1955 essa era (rispetto al meridiano di Greenwitch)

Polo magnetico	Longitudine	Latitudine
Sud	73°, 5 N	100° W
Nord	71°, 5 S	151° E

Linee di flusso

Le linee di flusso son ben lontane dall'essere regolari e distribuite, almeno in superficie, a causa della irregolare distribuzione sulla Terra dei bacini minerari di materiali ferrosi e dell'irregolare posizione e distribuzione del nucleo terrestre chiamato **NiFe** (Nichel, Ferro).

Anche in quota la distribuzione del flusso è alterata dall'influenza del campo magnetico solare.

Perciò le linee di flusso non sono nè parallele ai meridiani (**declinazione magnetica**) nè orizzontali (**inclinazione magnetica**).

Densità di flusso

Per avere un'idea dell'ordine di grandezza della densità del campo magnetico terrestre, diremo che esso varia fra (0,25 e 0,7) 10^{-9} **Wb/m^2**.

In particolare nelle seguenti località è

Località	Densità di flusso (10^{-9} Wb/m^2)
Polo magnetico Sud	0,7
Indonesia (tropici)	0,35
Galapagos (equatore)	0,25

Paragrafo 12.7

ELETTROSTATICA

Indice degli argomenti e delle pagine

PROPRIETA' ELETTROSTATICHE DELLE CARICHE ELETTRICHE

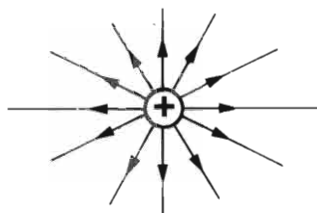
Si illustrano le proprietà elettrostatiche delle cariche elettriche e si riscontra che il campo elettrostatico forma un circuito aperto.

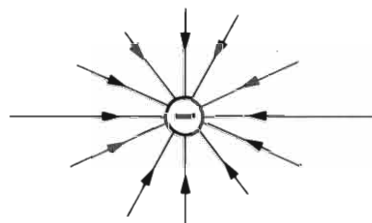
Una certa **carica elettrica** (10.11-2), è individuata come una **quantità di elettricità** e si misura in **coulomb (simbolo C)**.

Ogni carica elettrica può essere **positiva o negativa** ed è isolabile.

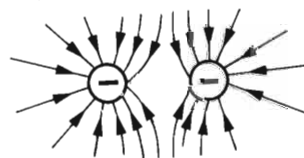
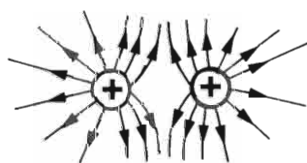
Essa, sia positiva o negativa, sia ferma o in moto, irradia il suo **Campo elettrico** uniformemente, se l'ambiente in cui essa è immersa (es. il vuoto o l'aria) è "dielettricamente" uniforme.

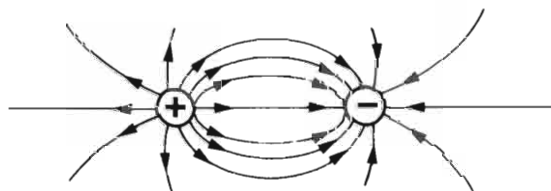
Infatti

una carica elettrica **positiva**,
ben isolata e distante da qualsiasi altra,
determina un campo elettrico radiale

che, per convenzione immaginiamo diretto **verso l'esterno.**

una carica elettrica **negativa**,
ben isolanta e distante da qualsiasi altra,
determina un campo elettrico radiale

che, per convenzione immaginiamo diretto **verso il centro.**

La presenza di altre cariche elettriche disturba l'uniformità del campo. Infatti, si come

due cariche dello stesso segno si respingono

il campo di entrambe si deformerà come mostrato nelle figure: mentre, siccome

due cariche di segno opposto si attraggono

il campo assumerà la configurazione illustrata qui sopra.

Attenzione. Anche nel caso di attrazione il circuito è aperto.
Infatti, seguendo le linee secondo la loro direzione, si nota che esse non formano un anello chiuso, ma vanno dal polo positivo al polo negativo senza tornare indietro.

Osservazione. Una carica, solo quando è in movimento, crea anche un campo magnetico chiuso: di questo se ne è parlato nei capitoli precedenti.

Nota. L'uniformità del campo elettrostatico può essere disturbata anche dalla non uniformità del mezzo in cui una carica si trova immersa, come vedremo di seguito.

POTENZIALE O TENSIONE DELLA CARICA ELETTRICA

Si fanno alcune considerazioni sulla carica elettrica come entità e sui potenziali che essa può assumere.

Non esiste una legge di Ohm elettrostatica

Infatti, poichè il circuito del campo elettrico è aperto, manca il concetto di flusso come termine analogo alla corrente.

Potenziale

Il termine analogo alla tensione è invece il potenziale della carica.

Esso è però un termine di confronto fra due entità, quindi non si potrà mai parlare di potenziale assoluto di una carica, ma di un potenziale di una carica rispetto ad un'altra.

Anche quando si parla di tensione di una carica rispetto ad un **potenziale di riferimento**, è evidente che si intende tensione "rispetto ad un'altra carica che è presente nel punto preso come riferimento".

Confronto. Anche l'acqua che si trova in un serbatoio posto in cima ad una torre possiede:
- una certa quota (potenziale) rispetto al suolo,
- un'altra quota rispetto al livello del mare,
- ed un'altra ancora (negativa, perchè più bassa) rispetto alla cima della montagna vicina.

Il "**mettere a terra**" un determinato apparecchio significa fare assumere alle sue strutture metalliche il medesimo potenziale del suolo, collegando l'apparecchio col suolo stesso mediante un conduttore.

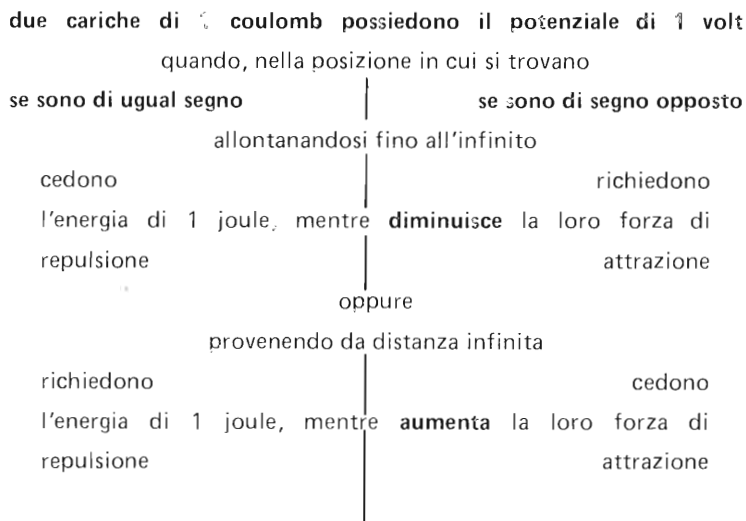
Coulomb, polarità, elettroni e protoni

Si è già visto in 10.11-2 che per unità di carica elettrica **negativa** si è preso un quantitativo di **elettroni** pari a $6{,}25 \times 10^{18}$ e lo si è chiamato **coulomb** (simbolo **C**).

Allo stesso modo, per unità di carica elettrica **positiva** si prende lo stesso quantitativo di **protoni** e questa carica ha ovviamente lo stesso nome: **coulomb** (simbolo **C**).

Potenziale della carica ed energia

Tensione e potenziale applicati alle cariche elettriche possono sviluppare energia che si misura in **joule**.

Diremo infatti che:

due cariche di 1 coulomb possiedono il potenziale di 1 volt

quando, nella posizione in cui si trovano

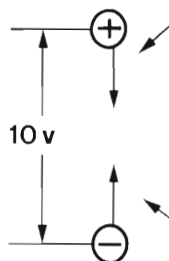
se sono di ugual segno	**se sono di segno opposto**
allontanandosi fino all'infinito	
cedono	richiedono
l'energia di 1 joule, mentre **diminuisce** la loro forza di	
repulsione	attrazione
oppure	
provenendo da distanza infinita	
richiedono	cedono
l'energia di 1 joule, mentre **aumenta** la loro forza di	
repulsione	attrazione

SEGNO RECIPROCO DI DUE CARICHE ELETTRICHE

Si fanno alcune osservazioni per evitare quegli errori di interpretazione a cui i neofiti vanno frequentemente incontro.

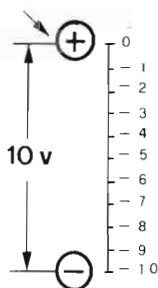
Esempio

Si abbiano due cariche uguali ed immobili, ma di segno opposto, fra le quali esista la tensione di 10 volt.

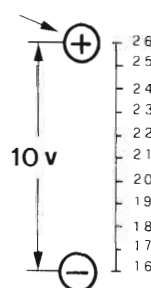
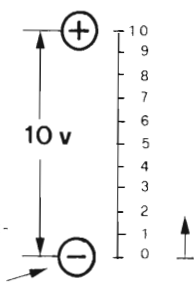
Passare da una carica all'altra non significa passare da 10 volt positivi a 10 volt negativi o viceversa, significa variare rispettivamente in diminuzione o in aumento di 10 volt il potenziale di partenza.

Il potenziale positivo della carica, va diminuendo man mano che ci si avvicina alla carica negativa

Il potenziale negativo della carica, va aumentando man mano che ci si avvicina alla carica positiva

A) Si passa dal potenziale positivo al negativo per valori decrescenti

Se la carica positiva si trova ad un potenziale di riferimento uguale a 0 V

si passa dalla positiva alla negativa per valori decrescenti da zero V a – 10 V

Se la carica positiva si trova ad un potenziale di 26 volt

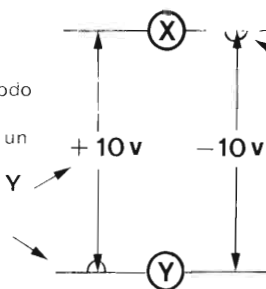
10 v
26 25 24 23 22 21 20 19 18 17 16

si passa dalla positiva alla negativa per valori decrescenti da 26 V a 16 V

B) Si passa dal potenziale negativo al positivo per valori crescenti

Se la carica negativa si trova ad un potenziale di riferimento di 13 volt

Osservazione

Talvolta, anzichè segnare le polarità, si usa mettere il segno accanto al valore numerico.

In questo caso, bisogna mettere bene in evidenza a quale carica ci si riferisce rispetto all'altra.

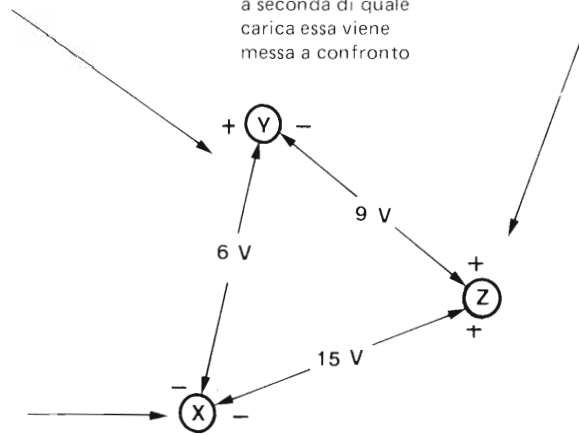
Infatti, in questo modo indicheremo che la carica X si trova ad un potenziale di 10 V **superiore** alla carica Y

mentre in questo modo indicheremo che la carica Y si trova ad un potenziale di 10 V **inferiore** alla carica X

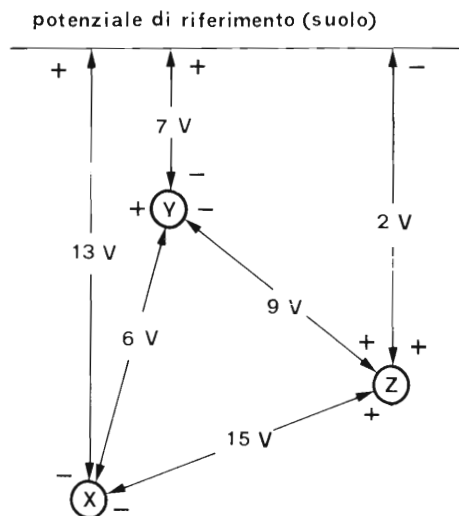
SEGNO RECIPROCO DI PIU' CARICHE ELETTRICHE

Continuano le osservazioni per evitare quegli errori di interpretazione a cui i neofiti vanno più frequentemente incontro.

Vedremo come due cariche dello stesso segno, possono avere diversa polarità a seconda del potenziale che una ha rispetto all'altra.

Esempio: Una carica, positiva rispetto all'altra, può essere negativa rispetto ad una terza che si trovi ad un potenziale superiore rispetto ad essa.

A) Tre cariche si trovino a potenziali diversi fra loro

B) La carica **Y**, delle stesse tre di prima, si trovi ad un potenziale di 7 V inferiore a quello di un punto di riferimento (ad es. il suolo)

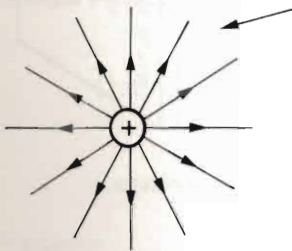
La carica **X** si trova di 13 V inferiore al potenziale del suolo essendo di 6 V inferiore alla carica **Y**, la quale si trova di 7 V inferiore al potenziale del suolo.

La carica **Z** si trova di 2 V superiore al potenziale del suolo essendo di 9 V superiore alla carica **Y**, la quale si trova di 7 V inferiore al potenziale del suolo

IMPORTANTI PROPRIETA' DELLE CARICHE ELETTRICHE

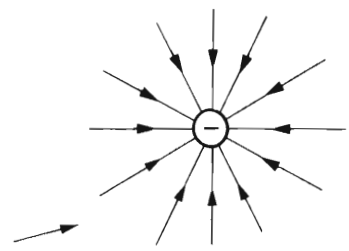
Si esaminano alcune proprietà delle cariche elettriche in rapporto al flusso che esse irradiano o che intercorre fra loro.

FLUSSO E CARICA ELETTRICA SI IDENTIFICANO

Cariche di ugual segno

Come abbiamo visto al 12.71-2, non esiste una legge di Ohm elettrostatica, perciò il concetto di flusso si identifica con la carica stessa.

Quindi (12.71-2)
la carica di 1 coulomb positiva,
genera un flusso uscente di 1 coulomb

mentre

la carica di 1 coulomb negativa,
genera un flusso entrante di 1 coulomb

Due o più cariche da 1 coulomb dello stesso segno, generano un flusso di 2 o più coulomb.

Cariche di uguale quantità e di segno opposto

Il flusso che emana dalla positiva viene interamente "assorbito" dalla negativa.

Cariche di quantità diversa e di segno opposto

Si "scambiano" il flusso competente alla minore e irradiano l'eccedenza.

Esempio: Due cariche di segno opposto, di valore rispettivamente di 2 e 5 coulomb, si scambiano il flusso di 2 coulomb e irradiano la rimanenza (3 coulomb). Questo flusso avrà la stessa polarità della carica maggiore.

In definitiva, vale l'espressione algebrica per due cariche di segno opposto

$$Q = Q_1 + Q_2$$

valore del flusso elettrico risultante (C) → Q; Q_1: valore della carica 1 (C); Q_2: valore della carica 2 (C)

Nota. I segni algebrici, che accompagnano i valori, coincidono con quelli elettrici.

La stessa espressione vale anche quando le cariche sono più di due ma con le seguenti precisazioni:

Nota. Se i termini di questa espressione sono di segno opposto, essa si riduce ad una differenza.

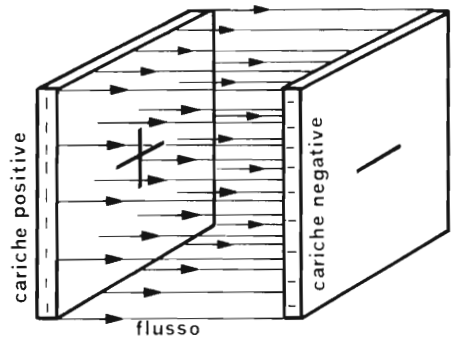
DENSITA' DI CARICA E DIELETTRICITA'

Non potendo funzionare la legge di Ohm per l'elettrostatica, si cercano altri modi per spiegare l'effetto dall'addensamento delle linee di flusso provocate da particolari materiali "dielettrici".

Flusso emanante e raccolto da cariche distribuite su di un piano

Le piastre a lato sono metalliche e sono caricate elettricamente di segno opposto, in eguale quantità.

La reciproca attrazione delle cariche e la teoricamente perfetta proprietà isolante del mezzo che le separa, fanno sì che le cariche restino inalterate sulle superfici affacciate.

Le cariche positive emanano un flusso elettrico che viene interamente raccolto dalle cariche negative.

E' importante notare che: **il flusso non cambia comunque si allontanino o si avvicinino le due piastre.**

Densità di carica

Poichè la carica si identifica col flusso (12.73-1), avremo una

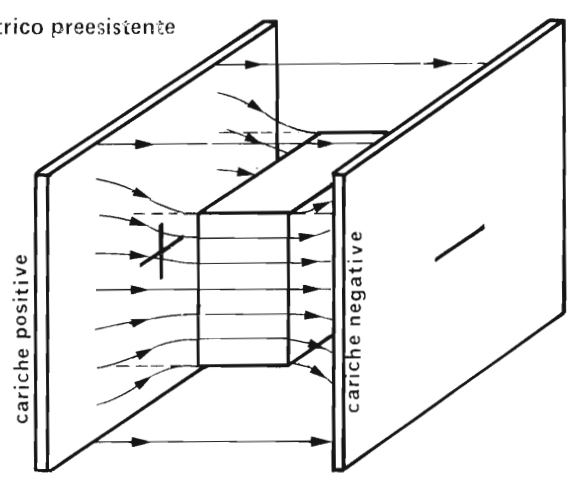
densità di flusso o di carica (in coulomb/m²) → $D = \frac{Q}{S}$ ← carica (in coulomb) diviso superficie di ogni piastra (in m²)

Introduzione di un materiale dielettrico nel mezzo dielettrico preesistente

Il materiale dielettrico crea un addensamento delle linee di flusso attraverso di esso.

E' evidente che il flusso totale non varii, perchè dipende unicamente dalle cariche.

Concluderemo perciò, per il momento, che il materiale dielettrico ha la facoltà di aumentare la densità del flusso, nel suo interno.

Per le caratteristiche del materiale dielettrico vedi sez. 2.

Costante dielettrica relativa di un materiale

Il rapporto fra

la densità di flusso nel dielettrico (coulomb m²) → Dd
e
la densità di flusso nel vuoto circostante (coulomb m²) → D

$$\frac{Dd}{D} = \varepsilon r$$

← si chiama **costante dielettrica relativa**

Essa è un numero puro e dice praticamente quante volte quel materiale è più dielettrico del vuoto.

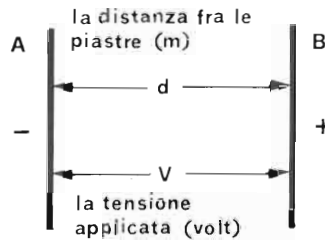
DEFINIZIONE DI GRADIENTE DI TENSIONE DEL CAMPO ELETTRICO

Si studiano le relazioni che intercorrono tra carica elettrica, flusso, tensione e distanza fra due piastre metalliche immerse nel vuoto.

Flusso e tensione

L'unico modo per modificare il flusso elettrostatico fra le piastre è quello di far variare il numero di cariche su ciascuna piastra, e l'unico modo di far variare il numero di cariche è quello di modificare la tensione (in volt) fra la piastra positiva e quella negativa.

Tensione e gradiente di tensione

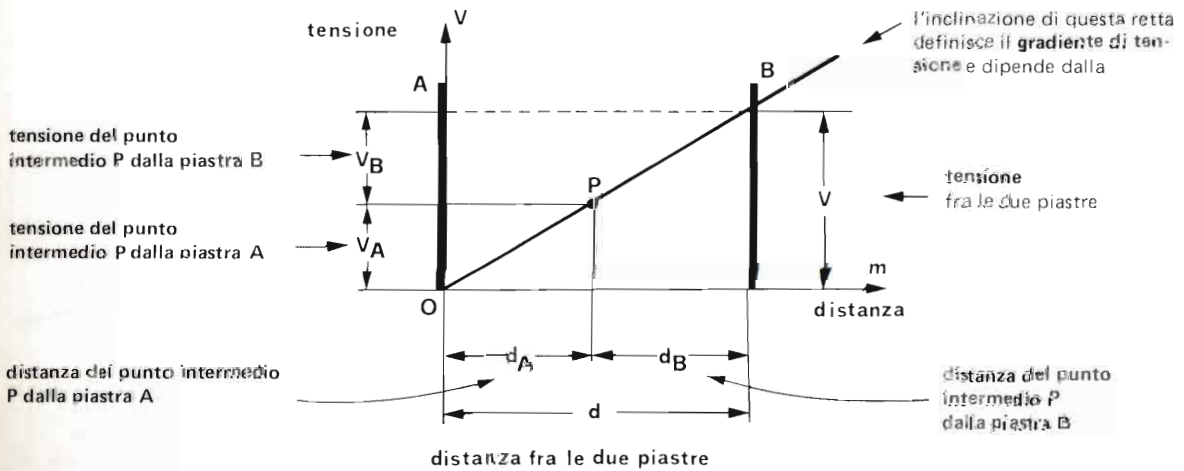
Dati →

il rapporto

tensione applicata (volt) — diviso — distanza fra le piastre (m)

$$\frac{V}{d} = F$$

si chiama **gradiente di tensione** (o tensione specifica o forza elettrica) e si misura in V/m (volt al metro)

Caratteristica grafica

Il diagramma mostra l'andamento lineare della tensione fra le piastre per un dato valore di potenziale sulla piastra positiva rispetto alla negativa supposta a potenziale zero.

Conclusione. Poichè è fissa la superficie delle piastre, la densità di carica aumenta con la tensione fra le piastre; e poichè è fissa anche la distanza fra le piastre, il gradiente di tensione aumenta con la tensione stessa fra le piastre.

Dunque, gradiente e densità stanno fra loro secondo un rapporto ben preciso che dipenderà unicamente dal mezzo interposto.

COSTANTE DIELETTRICA ASSOLUTA

Il gradiente di tensione e la densità di carica, sono fra loro proporzionali e non dipendono nè dalla distanza fra le piastre nè dalla superficie delle piastre.

Essi dipendono unicamente da una particolare natura del mezzo isolante interposto fra le piastre.

Costante dielettrica assoluta

Il rapporto fra — si chiama

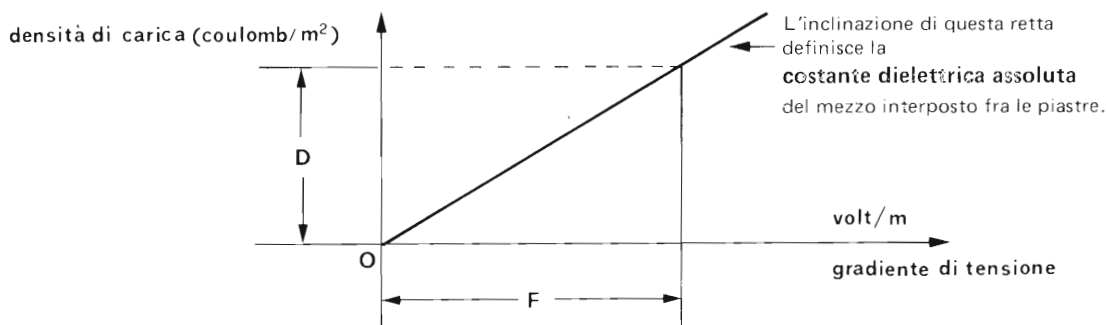
densità di carica $D = \frac{Q}{S}$ (C/m²)

e

gradiente di tensione $F = \frac{V}{d}$ (V/m)

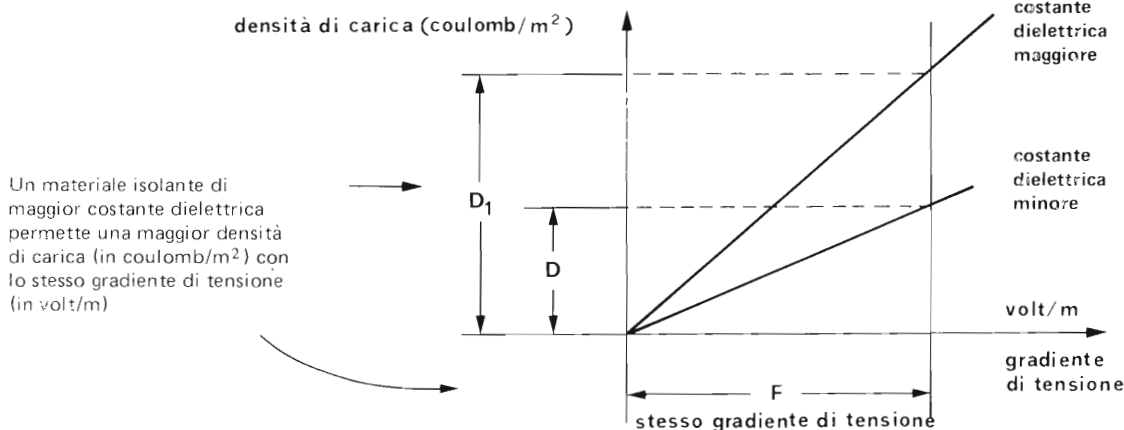
$$\frac{D}{F} = \varepsilon$$

costante dielettrica assoluta
e si misura in C/m² per ogni V/m oppure in farad/m (12.75-1)

Essa dipende dalle qualità dielettriche del materiale isolante interposto fra le piastre, secondo questo diagramma.

Il diagramma dice che, fissata la superficie e la distanza fra le piastre, se si fa aumentare il gradiente di tensione (aumentando la quantità di carica e quindi la tensione fra le piastre), aumenta nello stesso rapporto la densità di carica

Costante dielettrica assoluta del vuoto

E' un dato sperimentale che vale $\epsilon = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \frac{C/m^2}{V/m}$

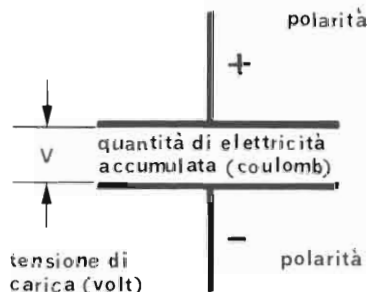
Considerazioni su costanti dielettriche diverse

STRUTTURA E PARAMETRI DEL CONDENSATORE

Si definisce un importante elemento del circuito: il condensatore; ed il relativo parametro: la capacità.

Definizione mediante grandezze elettriche

Da quanto precede abbiamo visto che un apparecchio costituito da due piastre affacciate ed isolate elettricamente con un dielettrico

è capace di addensare cariche elettriche (in coulomb/m^2) tanto maggiormente quanto più alto è il gradiente di tensione (volt/m) nel dielettrico.

Esso è stato perciò chiamato **condensatore**.

Fissate le sue dimensioni fisiche:

- superficie delle piastre (**armature**) ⟶ in m^2
- distanza fra le stesse ⟶ in m
- costante dielettrica del materiale che le tiene isolate e distanziate ⟶ in F/m
- oppure ⟶ in $C/m^2/V/m$

la quantità di carica (coulomb) che possiamo "introdurvi" dipende unicamente dalla tensione che applichiamo alle armature, oppure inversamente, la quantità di carica in esso contenute, si manifesta con una tensione (volt) ai capi delle sue armature.

Il rapporto fra (vedi anche 13.10-2),

quantità di carica introdotta (coulomb) ⟶ Q
e
tensione che si stabilisce (volt) ⟶ V

$$\frac{Q}{V} = C$$

⟵ si chiama capacità **e si misura in farad** (simbolo F)

Cioè unitariamente si ha la capacità di 1F (1 farad) quando un condensatore carico di 1C (1 coulomb) di elettricità, presenta la tensione di 1V (1 volt) ai suoi capi.

Definizione mediante grandezze geometriche e specifiche

Essendo inoltre (12.74-2) la costante dielettrica

$$\epsilon = \frac{D}{F}$$

D ⟵ densità $D = \frac{Q}{S}$

F ⟵ gradiente $F = \frac{V}{d}$

si ha $\epsilon = \frac{\frac{Q}{S}}{\frac{V}{d}} = \frac{Q}{V}\,\frac{d}{S}$; ma abbiamo appena dimostrato che $\frac{Q}{V} = C$

perciò

la costante dielettrica $\epsilon = C\,\frac{d}{S}$

- d ⟵ distanza fra armature (m)
- S ⟵ superficie di un armatura (m^2)
- C ⟵ capacità in farad (F)

e le sue dimensioni sono $F\,\frac{m}{m^2}$ cioè F/m

Dalla stessa espressione si può ricavare la

capacità in farad ⟶ $C = \epsilon\,\frac{S}{d}$

La capacità del condensatore
aumenta: se aumenta la superficie e se aumenta la costante dielettrica;
diminuisce: se aumenta la distanza **fra le piastre**

MODIFICA DELLA COSTANTE DIELETTRICA IN UN CONDENSATORE CARICO

Cosa cambia in un condensatore carico ed a circuito aperto quando cambiamo il tipo di dielettrico? La tensione ai suoi capi.

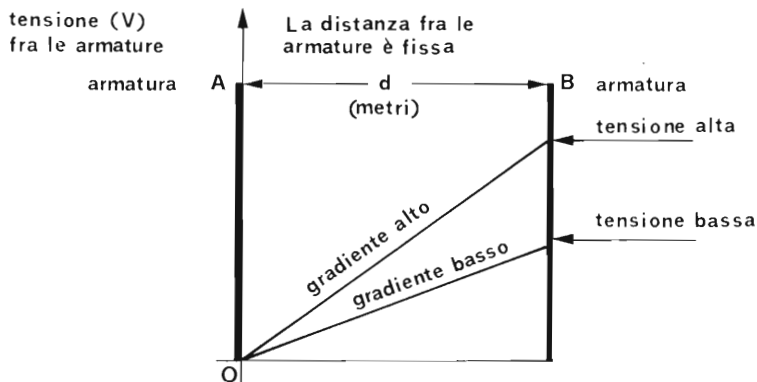
Come si modifica il gradiente di tensione

Un condensatore carico ha già una sua densità di carica predeterminata dalla costante dielettrica, dalla tensione applicata e dalla superficie dell'armatura.

La modifica della costante dielettrica nel condensatore carico, porta alla modifica del gradiente di tensione (12.74-1) per le seguenti ragioni

Prima conclusione

L'aumento di costante dielettrica abbassa il gradiente di tensione e viceversa

Come si modifica in conseguenza la tensione

Conclusione finale

L'aumento di costante dielettrica abbassa la tensione ai capi del condensatore carico e viceversa.

Ciò è provato anche matematicamente (12.75-1)

Se $C = \frac{Q}{V}$ sarà $V = \frac{Q}{C}$

Q ← la carica è fissa (condensatore carico)

C ← la capacità $C = \epsilon \frac{S}{d}$ aumenta con la costante dielettrica

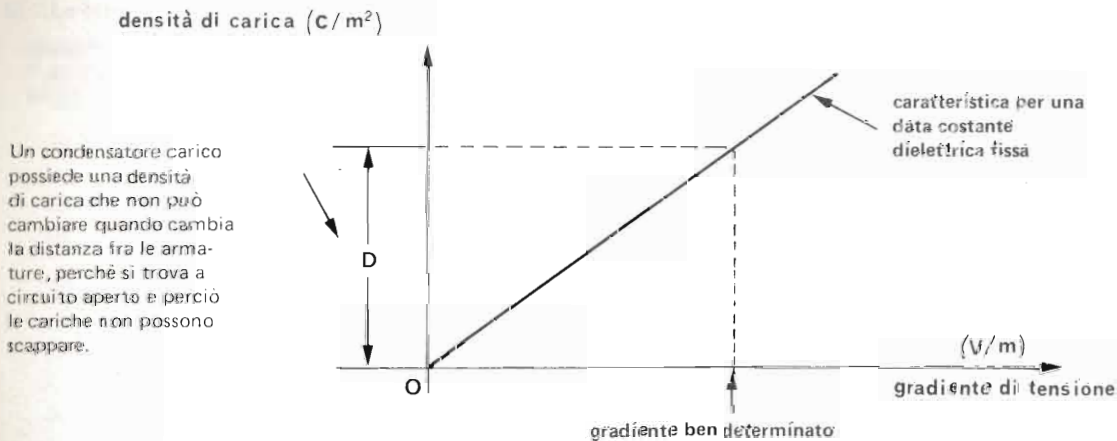
la tensione, essendo la capacità al denominatore, diminuisce se la capacità aumenta e viceversa.

MODIFICA DELLA DISTANZA FRA LE ARMATURE IN UN CONDENSATORE CARICO

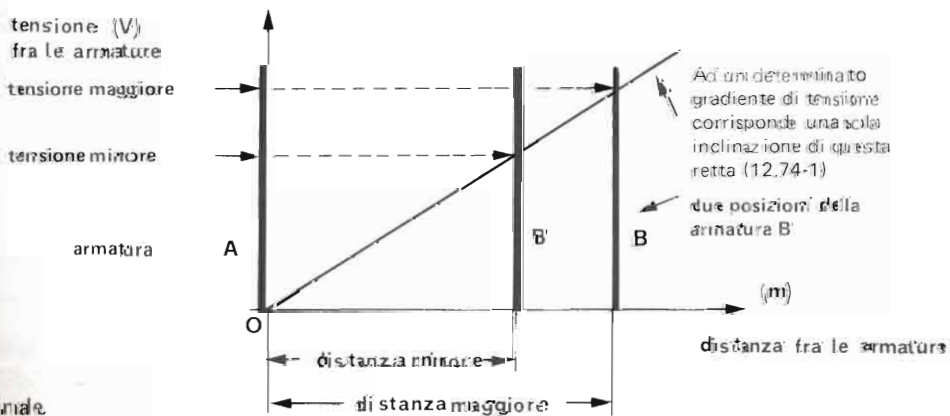
Cosa cambia in un condensatore carico ed a circuito aperto quando cambiamo la distanza fra le armature? Ancora la tensione ai suoi capi.

Il gradiente di tensione resta inalterato

Un condensatore carico ha già una sua densità di carica predeterminata dalla costante dielettrica, dalla tensione applicata e dalla superficie dell'armatura.

La modifica della distanza fra le armature, non modifica il gradiente di tensione perchè esso (vedi 12.74-2) dipende unicamente dalla densità di carica e dalla costante dielettrica (v. figura seguente).

Prima conclusione

Il gradiente di tensione non dipende dalla distanza fra le armature e perciò resta inalterato.

Come si modifica in conseguenza la tensione

Conclusione finale

L'aumento di distanza fra le armature innalza la tensione ai capi del condensatore carico e viceversa.
Sembra paradossale, ma ciò è provato anche matematicamente (12.75-1).

Se $C = \frac{Q}{V}$ sarà $V = \frac{Q}{C}$

Q ← la carica è fissa (condensatore carico)

C ← la capacità $C = \epsilon \frac{S}{d}$ diminuisce

essendo qui la capacità di denominatore, la tensione aumenta col diminuire della capacità

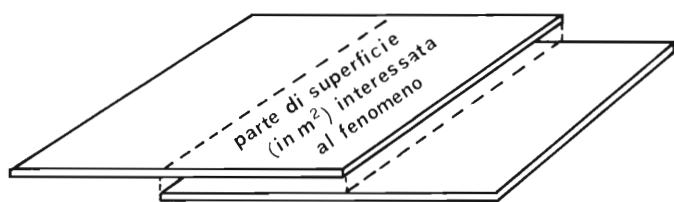
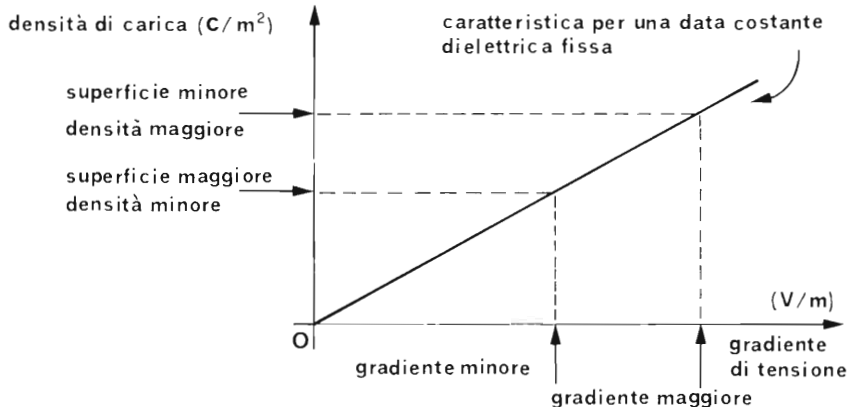
all'aumentare della distanza fra le armature, perchè questa è al denominatore dell'espressione.

MODIFICA DELLA SUPERFICIE DELLE ARMATURE IN UN CONDENSATORE CARICO

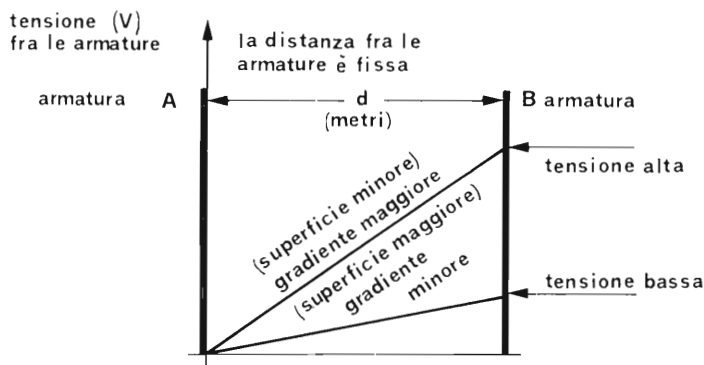
Cosa cambia in un condensatore carico ed a circuito aperto quando cambiamo la superficie delle armature? Sempre la tensione ai suoi capi.

Come si modifica il gradiente di tensione

Un condensatore carico ha già una sua densità di carica predeterminata dalla costante dielettrica, dalla tensione applicata e dalla superficie dell'armatura.

La modifica della superficie delle armature modifica il gradiente di tensione, perchè esso (12.74-2) dipende unicamente dalla densità di carica.

Prima conclusione

L'aumento di superficie utile fra le armature, diminuisce la densità di carica e fa diminuire il gradiente di tensione.

Come si modifica in conseguenza la tensione

Conclusione finale

L'aumento di superficie utile fra le armature, abbassa la tensione ai capi del condensatore carico.

Il fatto non sembri tanto paradossale se si pensa ad un serbatoio pieno.

Se gli si aumenta la capacità allargandolo, il livello del liquido contenuto diminuisce e viceversa.

Sembra paradossale, ma ciò è provato anche matematicamente (12.75-1)

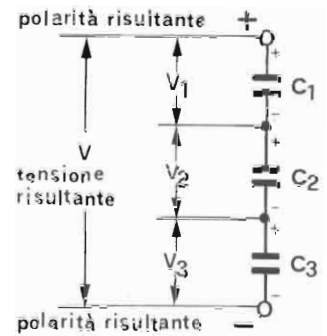
Vedi le stesse espressioni della pagina precedente (12.75-1).

- L'aumento di superficie fa aumentare la capacità
- L'aumento di capacità fa diminuire la tensione

COLLEGAMENTO IN SERIE DEI CONDENSATORI

Si esamina come si distribuiscono le cariche e le tensioni e si calcola il valore complessivo della capacità.

Il collegamento in serie

è quello qui illustrato: l'armatura positiva di uno, viene collegata con la negativa del successivo in modo da formare una catena con le due estremità libere.

A) **La tensione risultante** $V = V_1 + V_2 + V_3$

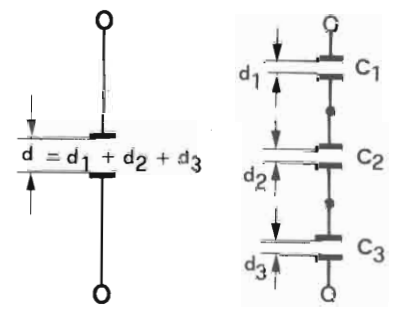
è uguale alla somma delle tensioni dei singoli componenti.

B) **La capacità risultante**

è quella che compete ad un unico condensatore avente la distanza equivalente fra le armature, uguale alla somma delle distanze equivalenti fra le armature dei singoli componenti.

Per distanza equivalente si intende quella che risulta immaginando i condensatori tutti uguali in dielettrico ed in superficie delle armature; cioè (12.75-1)

$$C_1 = \epsilon \frac{S}{d_1} \qquad C_2 = \epsilon \frac{S}{d_2} \qquad C_3 = \epsilon \frac{S}{d_3}$$

Partendo da questo concetto, cerchiamo di determinare la relazione che lega la capacità totale con le capacità dei componenti.

Da quanto precede, risulta (distanze singole e distanza totale)

$$d_1 = \epsilon \frac{S}{C} \qquad d_2 = \epsilon \frac{S}{C} \qquad d_3 = \epsilon \frac{S}{C} \qquad d = d_1 + d_2 + d_3 = \epsilon S \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)$$

La capacità totale,

essendo $C = \epsilon \frac{S}{d}$ sarà $C = \epsilon \frac{S}{\epsilon S \left(\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3} \right)} = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$

Concludendo:

la capacità risultante di più condensatori in serie è uguale...	$C = \frac{1}{\frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \frac{1}{C_3}}$	... all'inverso della somma degli inversi delle singole capacità componenti

C) **La carica risultante**

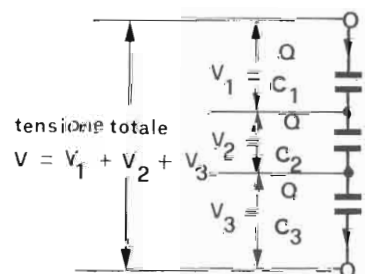
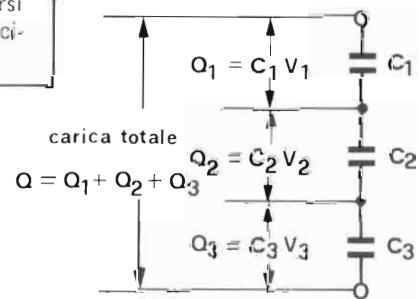
è uguale alla somma delle cariche componenti

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Questo è valido sempre

Per la **distribuzione delle tensioni**, bisogna distinguere due casi:

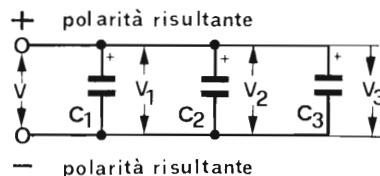
1) I condensatori erano già carichi prima di essere collegati in serie. In questo caso ciascuno mantiene la propria carica e tensione.
Solo durante l'eventuale scarica si arriva ad un livellamento delle tensioni come risulta nel caso seguente

2) I condensatori erano scarichi prima di essere collegati in serie. In questo caso la corrente di carica è uguale per tutti; perciò essi si caricano di quantità uguali indipendentemente dalla capacità.
La tensione che si stabilisce ai capi di ognuna, sarà di valore inverso alla propria capacità:

$$V_1 = \frac{Q}{C_1} \qquad V_2 = \frac{Q}{C_2} \qquad V_3 = \frac{Q}{C_3}$$

COLLEGAMENTO IN PARALLELO DEI CONDENSATORI

Si esamina come si distribuiscono le cariche e si calcola il valore complessivo della capacità.

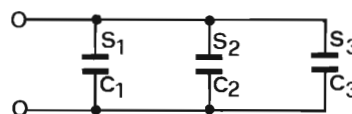
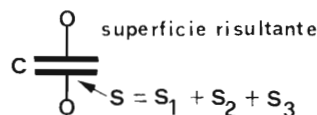
Il collegamento in parallelo

è quello qui illustrato: le armature positive vengono tutte collegate fra di loro e così le negative.

A) **La tensione risultante** $V = V_1 = V_2 = V_3$

è uguale alla tensione di ciascuna delle componenti che devono essere uguali fra di loro per definizione di collegamento parallelo.

B) **La capacità risultante**

è quella che compete ad un unico condensatore con superficie equivalente delle armature uguale alla somma delle superfici equivalenti delle armature dei singoli componenti.

S_1 C_1 — S_2 C_2 — S_3 C_3

Per superficie equivalente si intende quella che risulta immaginando i condensatori tutti uguali nel dielettrico e in distanza fra le armature; cioè (12.75-1)

$$C_1 = \epsilon \frac{S_1}{d} \qquad C_2 = \epsilon \frac{S_2}{d} \qquad C_3 = \epsilon \frac{S_3}{d}$$

Partendo da questo concetto cerchiamo di determinare la relazione che lega la capacità totale con la capacità dei singoli componenti.

Da quanto precede risulta (superfici singole e superficie totale):

$$S_1 = \frac{C_1 d}{\epsilon} \qquad S_2 = \frac{C_2 d}{\epsilon} \qquad S_3 = \frac{C_3 d}{\epsilon} \qquad S = S_1 + S_2 + S_3 = \frac{d}{\epsilon} \leftarrow (C_1 + C_2 + C_3)$$

La capacità totale,

essendo $C = \epsilon \dfrac{S}{d}$ sarà $C = \dfrac{\frac{d}{\epsilon}(C_1 + C_2 + C_3)}{d} = C_1 + C_2 + C_3$

Concludendo:

la capacità risultante di più condensatori in parallelo è uguale ...	$C = C_1 + C_2 + C_3$	... alla somma delle singole capacità componenti

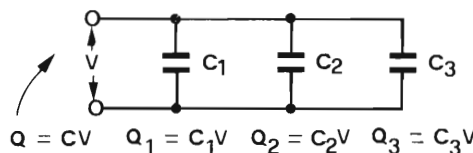
C) **La carica risultante**

è uguale alla somma delle singole cariche componenti

$$Q = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

Questo è valido sempre.

V — C_1 — C_2 — C_3

$Q = CV \quad Q_1 = C_1V \quad Q_2 = C_2V \quad Q_3 = C_3V$

Per quanto concerne la **distribuzione delle cariche**, bisogna distinguere due casi:

1) I condensatori erano già carichi quando sono stati collegati in parallelo. In questo caso, le tensioni si livellano alla tensione comune nel senso che i condensatori che hanno le tensioni maggiori, caricano gli altri finchè tutte le tensioni diventano uguali.

2) I condensatori sono scarichi quando vengono collegati in parallelo. In questo caso, siccome le tensioni sono uguali per tutti, ciascuno si carica di una quantità di elettricità proporzionale alla propria capacità

$$Q_1 = C_1 V \qquad Q_2 = C_2 V \qquad Q_3 = C_3 V$$